

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL CONCRETO PERMEABLE Y SU POSIBLE
APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA, COLOMBIA**



ANDRÉS FELIPE DE JESÚS CERVANTES CÁRDENAS

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2020

**TÍTULO DE INVESTIGACIÓN: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL CONCRETO
PERMEABLE Y SU POSIBLE APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA,
COLOMBIA.**

ANDRÉS FELIPE DE JESÚS CERVANTES CÁRDENAS

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO DE GRADO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR

PhD. ING. MARIAN SABAU

CODIRECTOR

PhD. ING. FAUSTO CANALES VEGA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA

2020

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad analizar el impacto de implementar un concreto permeable, donde el agua lluvia pueda infiltrarse sin comprometer parámetros básicos y funcionales. Se realizó un estudio a 50 diseños de mezcla de concreto permeable realizados a nivel local e internacional, se utilizó la guía de la norma ACI 522-R para proponer el diseño de 2 concretos permeables y corroborar su aplicabilidad en la ciudad de Barranquilla, que actualmente tiene un déficit en el sistema de drenaje que da origen a grandes arroyos cuando llueve. El análisis de resultados se realizó por medio de tablas, gráficos y se aplicó la regresión lineal simple y múltiple como método estadístico para encontrar correlación entre las diferentes variables analizadas. La regresión múltiple realizada a los concretos permeables del grupo G_A Tradicional dio como resultado un coeficiente de correlación múltiple de 0,88 calificándola de fuerte y un R^2 ajustado de 0,54. Se consideró que el diseño de mezcla N1 puede soportar una intensidad de lluvia de 223,8 mm/h mientras que el N2 soporta 96 mm/h la diferencia se debe al contenido de vacíos calculado, de 24% y 20% respectivamente. Dado los resultados obtenidos se puede afirmar que la aplicación de concretos permeables es una alternativa viable para la mitigación de la problemática planteada, además, de ser más económico que un concreto tradicional.

Palabras clave: infiltración, porosidad, concreto permeable, intensidad de lluvia

Abstract

The purpose of this work is to analyze the impact of implementing a pervious concrete, where rainwater can infiltrate without compromising basic and functional parameters. A study of 50 designs of pervious concrete mix from the literature was carried out. The guide of the ACI 522-R standard was used to propose the design of 2 pervious concrete mixes and corroborate their applicability in Barranquilla, that currently has a deficit in the drainage system that gives rise to large streams when it rains. The analysis of results was carried out by means of tables, graphs, and simple and multiple linear regression was applied as a statistical method to find a correlation between the different variables analyzed. The multiple regression carried out on the pervious concretes of the G_A_Traditional group resulted in a coefficient of multiple correlation of 0,88, rating it as strong and an adjusted R^2 of 0,54. It was considered that the N1 mix design can withstand a rain intensity of 223,8 mm/h while the N2 supports 96 mm/h, the difference is due to the calculated void content of 24% and 20%, respectively. Given the results obtained, it can be affirmed that the application of pervious concrete is a viable alternative for the mitigation of the problem presented, in addition to being cheaper than traditional concrete.

Keywords: infiltration, porosity, pervious concrete, rain intensity

Contenido

| | |
|---|----|
| Lista de tablas y figuras..... | 9 |
| Glosario de símbolos y términos | 13 |
| 1. Introducción | 14 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 16 |
| 1.2 Antecedentes..... | 17 |
| 1.3 Justificación | 19 |
| 2 Objetivos del estudio..... | 21 |
| 2.1 Objetivo general | 21 |
| 2.2 Objetivos específicos | 21 |
| 2.3 Hipótesis | 21 |
| 2.4 Operacionalización de variables | 21 |
| 2.5 Metodología de investigación..... | 23 |
| 2.5.1 Tipo de investigación..... | 23 |
| 2.5.2 Diseño metodológico..... | 23 |
| 2.5.3 Método de investigación..... | 27 |
| 2.5.4 Limitación de investigación..... | 27 |
| 3 Marco referencial | 28 |
| 3.1 Marco teórico..... | 28 |
| 3.1.1 Concreto permeable..... | 28 |
| 3.1.2 Materiales. | 34 |
| 3.1.3 Herramientas y equipo..... | 43 |
| 3.1.4 Análisis hidrológico e hidráulico del concreto permeable. | 45 |
| 3.1.4.1 Estudios hidrológicos. | 46 |
| 3.2 Estado del arte | 48 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2.1 | Normatividad internacional..... | 65 |
| 4 | Metodología aplicada..... | 68 |
| 4.1 | Diseño de la investigación..... | 68 |
| 4.2 | Diseño hidrológico | 69 |
| 4.2.1 | Criterios del diseño hidrológico | 72 |
| 4.2.2 | Cálculo de curvas IDF por método simplificado..... | 72 |
| 4.2.3 | Diseño hidráulico..... | 79 |
| 4.2.4 | Diseños de mezcla para la ciudad de Barranquilla. | 82 |
| 4.2.5 | Costo de producción. | 93 |
| 4.3 | Diseño estructural del pavimento | 98 |
| 4.3.1 | General..... | 98 |
| 4.3.2 | Base granular. | 98 |
| 4.3.3 | Clasificación del suelo en Barranquilla. | 100 |
| 4.3.4 | Selección del espesor..... | 104 |
| 4.4 | Estudios de revisión en la literatura..... | 107 |
| 4.4.1 | Beneficios ambientales. | 108 |
| 4.4.2 | Estudios de mantenimientos. | 111 |
| 4.4.3 | Aplicaciones y usos. | 113 |
| 4.5 | Estudios experimentales en la literatura. | 113 |
| 5 | Propiedades del concreto permeable..... | 120 |
| 5.1 | Dosificación..... | 120 |
| 5.2 | Parámetros del concreto permeable | 131 |
| 6 | Análisis de resultados | 134 |
| 6.1 | Resistencia a la compresión..... | 134 |
| 6.2 | Resistencia a flexión..... | 137 |

6.3 Permeabilidad 139

7 Conclusiones 142

Referencias 145

Anexos..... 166

Lista de tablas y figuras

Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 Tipos de cemento Portland..... | 35 |
| Tabla 3.2 Especificaciones del agregado grueso..... | 37 |
| Tabla 3.3 Recomendación del comité ACI | 38 |
| Tabla 3.4 Gradación requerida para el agregado grueso | 39 |
| Tabla 3.5 Tipos de aditivos | 41 |
| Tabla 3.6 Concentración de elementos y sustancias químicas permitidas en el agua potable | 42 |
| Tabla 4.1 Valores de ajuste por región..... | 73 |
| Tabla 4.2 Estación Ernesto Cortissoz precipitación máxima anual histórica en 24 horas | 74 |
| Tabla 4.3 Resultados estadísticos..... | 75 |
| Tabla 4.4 Período de retorno en años (valores en mm/h)..... | 76 |
| Tabla 4.5 Resumen de los diseños de mezcla | 92 |
| Tabla 4.6 APU para el diseño de mezcla N1..... | 95 |
| Tabla 4.7 APU para el diseño de mezcla N2..... | 96 |
| Tabla 4.8 Tipos de suelos ACI 330-R | 99 |
| Tabla 4.9 Rangos de valor k recomendados para varios tipos de suelo | 103 |
| Tabla 4.10 Tipos de suelo de subrasante y valores de soporte aproximados | 104 |
| Tabla 4.11 Módulo de reacción de subrasante k^* | 105 |
| Tabla 4.12 Tablas de diseño de espesor de pavimento para hormigón permeable | 106 |
| Tabla 4.13 Clasificación de artículos de revisión | 107 |
| Tabla 4.14 Clasificación de artículos experimentales | 115 |
| Tabla 5.1 Dosificación grupo A sin aditivo | 120 |
| Tabla 5.2 Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_A Tradicional | 122 |
| Tabla 5.3 Dosificación grupo A Modificado | 123 |
| Tabla 5.4 Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_A Modificado..... | 125 |
| Tabla 5.5 Dosificación grupo B sin aditivo..... | 126 |
| Tabla 5.6 Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_B Tradicional | 128 |
| Tabla 5.7 Dosificación grupo B Modificado..... | 129 |
| Tabla 5.8 Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_B Modificado..... | 131 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.9 Información detallada de todos los diseños de mezclas estudiados para la investigación | 132 |
| Tabla 6.1 Resumen de diseños mezcla contra resistencia a compresión | 134 |
| Tabla 6.2 Comparación de diseños propuestos contra el promedio G_B_Tradicional | 136 |
| Tabla 6.3 Resumen de diseños contra resistencia a flexión | 137 |
| Tabla 6.4 Resumen de diseños contra permeabilidad | 140 |

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Recopilación de la primera fase de búsqueda. Fuente: Elaboración propia. | 25 |
| Figura 2.2 Recopilación de la segunda fase de búsqueda. Fuente: Elaboración propia..... | 26 |
| Figura 3.1 Principales ventajas y desventajas del concreto permeable. Fuente: Elaboración propia. | 29 |
| Figura 3.2 Resistencia a la compresión típica relacionada con la porosidad. Adaptada de: Meininger (1988)..... | 30 |
| Figura 3.3 Resistencia a la flexión típica relacionada con la porosidad. Adaptada de: Meininger (1988). | 32 |
| Figura 3.4 Tasa de percolación versus contenido de vacíos. Adaptada de: Meininger (1988). | 33 |
| Figura 3.5 Los permeámetros ASTM C1701 (B) Y NCAT (A). Tomada de: Kayhanian et al. (2009) | 52 |
| Figura 3.6 Revisión de la literatura, concreto de baja resistencia - Grupo B. Fuente: Elaboración propia..... | 54 |
| Figura 3.7 Revisión de la literatura, concretos de alta resistencia - Grupo A. Fuente: Elaboración propia..... | 58 |
| Figura 3.8 Ubicación de la geomalla en la vigueta. Tomada de: Meng et al. (2019) | 60 |
| Figura 3.9 Concreto permeable decorativo para los Juego Olímpicos de 2008. Tomada de: Concretedecor (2010). | 62 |
| Figura 3.10 Espesor de concreto decorativo juego olímpicos de Beijing, 2008. Tomada de: Concretedecor (2010). | 63 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.11 (A) Implementación de concreto permeable en plazoletas. (B) Utilización de concreto permeable en senderos peatonales, ambas fotos en Panamá. Tomada de: Hormigón Express S.A. (2018). | 64 |
| Figura 3.12 (A) Avenida Moctezuma (B) Instituto de Vivienda del Estado (C) Plaza central de Soyaló. Todas las fotos son en México. Tomada: Valdivia (n.d.). | 64 |
| Figura 3.13 Exhibición de Eagle Canyon, zoológico de Portland, Oregon. Tomada de: The Concrete Network (n.d.). | 65 |
| Figura 4.1 Organigrama general de la investigación. Fuente: Elaboración propia. | 68 |
| Figura 4.2 Resumen de lluvias máx. en 24 horas, últimos 65 años Fuente: Elaboración propia. | 71 |
| Figura 4.3 Curvas IDF para la ciudad de Barranquilla. Fuente: Elaboración propia. | 78 |
| Figura 4.4 Selección de contenido de vacíos. Adaptada de: Meininger (1988). | 80 |
| Figura 4.5 Relación entre el contenido de pasta y porosidad. Tomado de: Meininger (1988). | 84 |
| Figura 4.6 Correlación entre la resistencia a compresión y la relación A/C. Tomado de: Meininger (1988). | 85 |
| Figura 4.7 APU típica de un concreto de 2.400 psi. Fuente: Unión temporal de obras hidráulicas (2020). | 94 |
| Figura 4.8 Resumen de costos. Fuente: Elaboración propia. | 98 |
| Figura 4.9 Ubicación de los sondeos de exploración geotécnica. Fuente: Tomado de Moreno-Rodríguez (2014). | 101 |
| Figura 4.10 Perfil estratigráfico de Barranquilla, profundidad 1 metro. Fuente: Tomado de Moreno-Rodríguez (2014). | 102 |
| Figura 4.11 Representación del fenómeno de isla de calor. Tomada de: María Blender (2015). | 109 |
| Figura 4.12 Fotografía térmica de las losas de concretos. Tomada de: Li et al. (2013) | 110 |
| Figura 4.13 Mantenimiento preventivo con hidro-lavadora. Tomada de: Pavipor (2018). | 112 |
| Figura 4.14 Clasificación de los estudios en la literatura para su análisis estadístico. Fuente: Elaboración propia. | 114 |
| Figura 4.15 Resumen de artículos experimentales. Fuente: Elaboración propia. | 119 |
| Figura 5.1 Coeficiente de correlación. Tomado de: Martínez et al. (2009) | 121 |
| Figura 5.2 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Alto tradicional. Fuente: Elaboración propia. | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.3 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Alto modificado. Fuente: Elaboración propia. | 124 |
| Figura 5.4 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Bajo tradicional. Fuente: Elaboración propia. | 127 |
| Figura 5.5 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo bajo modificado. Fuente: Elaboración propia. | 130 |
| Figura 6.1 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a la flexión del concreto permeable. Fuente: Elaboración propia. | 138 |

Glosario de símbolos y términos

CP: Concreto permeable.

N1: Primer diseño de mezcla propuesto.

N2: Segundo diseño de mezcla propuesto.

ρ : Densidad del agregado grueso.

RP: Resina polimérica.

SP: Superplastificante.

ML: Modificador líquido.

PI: Plastificante.

RA: Reductor de agua.

CR: Concreto reciclado.

EA: Emulsión acrílica.

CH: Control de hidratación.

FS: Escoria de horno.

Rt: Retardante.

RAAR: Reductor de agua de alto rango.

DS: Desviación estándar de los datos.

POT: Plan de Ordenamiento Territorial

1. Introducción

Colombia se enfrenta a un crecimiento del sector de la construcción, dada esta situación se ve obligado a la búsqueda de nuevas tecnologías, para una mayor sostenibilidad, y eficiencia. La ciudad de Barranquilla no es ajena al aumento en los trabajos del sector de construcción, esta es comúnmente reconocida como una urbe con carencia de control de aguas pluviales, debido a su poca planificación pasada en obras civiles. Actualmente la localidad está inmersa en la problemática anteriormente mencionada y que se conoce que es exacerbada por el sector de construcción, sin embargo, dicho sector es el encargado de desarrollar las técnicas y métodos para la pavimentación de los terrenos en Barranquilla (El Herald, 2019a).

Cuando se producen las precipitaciones en la ciudad se generan escorrentías superficiales, producto de la topografía local estas escorrentías tienen puntos de encuentro en común, cuando esto sucede da a lugar a la formación de grandes arroyos que se concretan en puntos críticos de la ciudad, además, se tiene poca capacidad de drenaje. Se hace evidente que estos problemas resultan en cuantiosas pérdidas económicas, por ejemplo, por el colapso del sector del transporte (El Herald, 2018, 2019a, 2020).

Las superficies de pavimento reciben grandes volúmenes de aguas lluvias, existe la posibilidad de aplicar concreto permeable como estrategia para apoyar el manejo de las escorrentías, de este modo se evitaría varios inconvenientes para la ciudad y disminuyendo los efectos de las interrupciones en el tráfico. Con la aplicación de esta tecnología, se lograría una mejora en los concretos de sectores específicos de la ciudad, aumentado el control de escorrentías superficiales y por lo tanto las aguas que resulten de la lluvia estarían redirigidas al suelo (Flores & Pacompia, 2015).

En los años 70 surge el concepto de concreto permeable en los Estados Unidos, teniendo como objetivo ser un nuevo sistema de aprovechamiento del agua, aplicado en superficies de aparcamientos y bajos tránsitos vehiculares, el concreto permeable es considerado una tecnología sostenible. En la última década, esta tecnología ha generado gran interés por parte del área de la construcción, debido a sus bajos costos económicos, ahorro de materiales y simultáneamente crea zonas aptas para el tránsito vehicular. Sin embargo, ha sido poca la aplicación de los concretos permeables en los países en vía de desarrollo (Fernández & Navas, 2012).

La creación de políticas, normas y estudios científicos en Colombia es poca para afrontar esta problemática, por lo tanto, en la mayoría de los casos se opta por tomar diseños tradicionales. La Universidad de la Costa, desde su departamento de ingeniería civil y ambiental, encontró la necesidad de realizar una investigación acerca de los concretos permeables con la finalidad de evaluar su comportamiento, establecer criterios de aplicación y reconocer si son una opción potencialmente viable para Barranquilla.

1.1 Planteamiento del problema

Barranquilla, también conocida como puerta de oro de Colombia o la arenosa, es la principal ciudad de la región Caribe, a través de esta entraron al país grandes adelantos tecnológicos como lo es la radio, el cine, la televisión, la aviación, el ferrocarril, la navegación fluvial, entre otros, lo cual fue posible gracias a su condición natural de ciudad-puerto (Puerto De Barranquilla Sociedad Portuaria, 2018).

Todo esto le dio un gran desarrollo económico, sin embargo, debido al constante crecimiento, día a día de obras de infraestructura arrastrando e intentando corregir los errores de planificación del pasado que dieron origen a la formación de arroyos. Esta situación es cada vez más compleja debido al crecimiento urbano. La mayoría de áreas están siendo impermeabilizadas, haciendo que el caudal de los arroyos aumente día a día y con ello aumente su peligrosidad (El Tiempo, 2018; Publimetro, 2018).

Además, Barranquilla actualmente presenta problemas en la interconexión de su red de alcantarillado, algunas zonas presentan déficit para el manejo del volumen completo de precipitación, entonces, la ciudad sufre pérdidas económicas porque el sistema de transporte colapsa, eléctrico, las viviendas se inundan y el peor de los casos es la pérdida de vidas humanas (El Tiempo, 2018; Publimetro, 2018). La fracción de precipitación que consigue infiltrarse en el suelo es mínima, debido a que la gran mayoría de los concretos de la ciudad son impermeables, por esta razón se debe fomentar la creación de sistemas de construcción sostenibles, con una alta eficiencia en el servicio para contener las precipitaciones de manera óptima.

1.2 Antecedentes

Para mitigar los efectos concurrentes de los inconvenientes en la evacuación de aguas pluviales y las condiciones de escurrimiento, en la última dos décadas se ha estado perfeccionando a nivel global un método alternativo de diseñar concretos, construyendo una estructura que permita el paso del agua a través de la capa superficial hacia el interior de la estructura, evitando así la acumulación de agua en su superficie Environmental Protection Agency (EPA, 1999).

El surgimiento de esta tecnología, llamada concreto permeable se dio en Europa en el siglo XIX. No obstante, sus aplicaciones y usos crecieron especialmente al finalizar la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta ante la necesidad de reconstruir edificaciones y carreteras con recursos económicos limitados. La insuficiencia de materiales, así como el elevado costo de estos y su movilización y desplazamiento al lugar de construcción, dieron paso a la implementación de un concreto sin agregado finos que disminuye los contenidos de cemento (pasta) en las mezclas y permitía reciclar escombros (Fernández & Navas, 2012).

Los concretos con capacidad permeable son aquellos con una capa porosa y la estructura del pavimento sirve como mecanismo de almacenamiento de aguas de lluvias. Esta tecnología consiste usualmente en una dosificación de cemento Portland tipo I, agregado grueso y agua; en lo que da como resultado una porosidad típica entre el 15% y 30%. Esta configuración reduce considerablemente las propiedades mecánicas del concreto permeable, por lo tanto su uso no es tan amplio en el sector de la construcción (Chindaprasirt et al., 2008; Huang et al., 2010; Yu et al., 2019).

Aunque los CP son usados en los Estados Unidos, generalmente se limitan solo a estacionamientos, calles de acceso básico, áreas de recreación que transportan vehículos livianos o tráfico lento. Se han realizado investigaciones muy limitadas sobre diseño empírico

mecanicista y observación de rendimiento a largo plazo de pavimentos permeables que transportan cargas pesadas y mucho tráfico (Harvey et al., 2017; Jones et al., 2010; Saadeh et al., 2019). Una evaluación reciente sugirió el gran potencial de la mezcla de concreto permeable en la pavimentación de carreteras de bajo volumen como: calles locales, calzadas peatonales y posiblemente en arterias y autopistas en el futuro, si se desarrollan procedimientos que busquen una optimización en las propiedades mecánicas como: resistencia a compresión y la flexión, para poderlo implementar en las diferentes áreas del transporte aportando así una tecnología con menor impacto ambiental. Con el tiempo, se dio paso al uso de un material permeable que permitiera transformar la escorrentía superficial en infiltración y además cumpliera una función práctica dentro del desarrollo urbano (Xie et al., 2019; Zhong et al., 2018).

En los últimos tiempos, un concepto alternativo de control de aguas pluviales se ha posicionado en un estatus muy importante del sistema de drenaje urbano. Las mejores prácticas de control son técnicas que tienen como objetivo garantizar el dominio de las aguas pluviales, que sean absorbidas de la manera más rápida y lo más cerca posible de su fuente de origen, evitando el fenómeno de escorrentía de este modo mitigando las posibles inundaciones aguas abajo. La Agencia de Protección Ambiental ha desarrollado este concepto en los años 80 (Batezini & Balbo, 2015; EPA, 1999).

La aplicación de concreto permeable ocupa un porcentaje insignificante en el campo de la construcción frente al concreto convencional, siendo aproximadamente el 2% (Moujir & Castañeda, 2014).

1.3 Justificación

Barranquilla crece como una ciudad que arrastra sus errores de planificación en el pasado, principalmente el sector de la construcción (Panza, 2014). La Secretaria distrital de Planeación, Distrito de Barranquilla en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) 2012 – 2032, fue objeto de cuestionamientos a causa de una revisión por el grupo de trabajo académico interdisciplinario de la Universidad del Norte, donde señaló que Barranquilla continuaba presentado errores en su planificación (Universidad del Norte, 2013).

En los aspectos a mejorar más críticos se encontró que:

- En el POT Barranquilla no disponía de un expediente urbano y no fue hasta 28 de febrero de 2014 que se añadió esta información.
- La cartografía suministrada por la Secretaria Distrital para el análisis de la propuesta es de baja calidad. La escala utilizada no permite visualizar y ubicar de manera concreta los sitios en los que se plantean las intervenciones.
- El plan presenta una expansión del espacio público, estimando pasar de 0,85 m² a 15 m² por habitante. No obstante, no especifica métodos para lograrlo ni establece presupuesto para ello (Alcaldía de Barranquilla; Universidad del Norte, 2013).

En medio de toda esta problemática surge este proyecto con el fin de apoyar en la mitigación de los arroyos a raíz del mal sistema de drenaje con el que cuenta la malla vial de la ciudad, la falta de compromiso por parte de la comunidad incrementa esta problemática, cuando se dan las precipitaciones muchas personas depositan desechos en las calles.

La ingeniería civil tiene como fin servirle a la comunidad para satisfacer necesidades y mejorar la calidad de vida, siguiendo esta premisa se visualiza una ciudad sin la problemática de movilidad y seguridad a razón de los arroyos (Blu Radio, 2019; El Tiempo, 2020b).

La tecnología del concreto permeable se postula como una posible solución al manejo de las escorrentías superficiales (Kayhanian et al., 2019; Sandoval et al., 2020), también, se evitaría el arrastre de los desechos sólidos que vienen siendo lanzados a las calles de Barranquilla y que terminan en cuerpos de aguas (El Heraldó, 2019b; El Tiempo, 2020c).

Esta investigación se presenta como una alternativa de innovación frente al uso de los concretos tradicionales, estos poseen características como: trabajabilidad, cohesividad, durabilidad y resistencia, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC, A.C, 2004). El concreto permeable además de presentar las características anteriormente mencionadas, exhibe la cualidad de porosidad. Presentar una estructura no maciza, con agujeros interconectados que permitan el paso de luz, aire o fluidos es porosidad Orlando (2004). Esta naturaleza permite el paso de agua entre la estructura porosa hasta el suelo, es decir, funciona como un filtro que no solo mejora la calidad del agua, sino que también funciona para remoción de metales pesados (Lee et al., 2013; J. Liu & Borst, 2018; Xie et al., 2019; K. Zhang et al., 2018).

2 Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de los concretos permeables aplicados en pavimento rígido, en vías de bajo flujo vehicular e identificar beneficios ambientales y económicos para la ciudad de Barranquilla.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer dos diseños de mezcla potencialmente viables de aplicar para la ciudad de Barranquilla regidos mediante la norma ACI 522-R.
- Determinar el espesor de la capa de concreto permeable para su uso en parqueadero, ciclo rutas, terrazas de casas, vías de bajo tránsito vehicular.
- Comparar el coste de un metro cúbico de concreto permeable versus un concreto tradicional de 17 MPa y comparar la viabilidad de la aplicación costo-beneficio.

2.3 Hipótesis

El concreto permeable se puede aplicar en la ciudad de Barranquilla, en zonas de bajo tránsito vehicular, como lo son: parqueaderos livianos, ciclo rutas, parques, andenes, además del manejo de las escorrentías superficiales, todo esto a un bajo costo frente al concreto tradicional.

2.4 Operacionalización de variables

Objetivo general

| Definición del problema | Hipótesis | Variables | Indicadores | Factor a medir |
|---|--|--|---|-----------------------------------|
| ¿Cómo se puede usar el concreto permeable para dar manejo a las escorrentías producto de precipitaciones? | La incorporación de zonas con concreto permeable disminuye o elimina las escorrentías y trae beneficios ambientales. | Independiente Precipitación con alta intensidad puede superar la permeabilidad del concreto. | Datos de precipitación, tomados de la estación meteorológica Ernesto Cortissoz. | Capacidad de Infiltración mm / h. |
| | | Dependiente Concreto con alta porosidad poseen mayor infiltración. | Porosidad requerida. | Porosidad de diseño. |

Objetivo específico 1

| Definición del problema | Hipótesis | Variables | Indicadores |
|---|--|---|--|
| ¿Cuál es el diseño de mezcla de concreto permeable idóneo para Barraquilla? | Siguiendo las recomendaciones de la norma ACI 522-R (2010) se puede establecer dos diseños de mezcla para Barraquilla. | Independiente Dosificación del cemento, agua, agregado. | Dosificación de los materiales que constituyen concreto permeable. |

Objetivo específico 2

| Definición del problema | Hipótesis | Variables |
|--|---|---|
| ¿Qué espesor debe tener una capa de concreto permeable para soportar un tránsito vehicular bajo? | La capa de rodadura ronda los 20 cm de espesor como valor máximo. | Independiente Implementar agregado grueso con una alta densidad mejora la resistencia del concreto. |

Objetivo específico 3

| Definición del problema | Hipótesis | Variables | Indicadores | Factor a medir |
|---|---|--|------------------------------|-----------------------------------|
| ¿Cuáles son los costos de un concreto tradicional versus el concreto permeable? | El concreto permeable tiene un costo por metro cubico menor al tradicional. | Independiente Costo de materias primas y cantidades de obra. | Análisis de precio unitario. | Inversión final por metro cubico. |
| | | Dependiente Cantidad de área que se quiera pavimentar. | Replanteo de obra. | Volumen de concreto. |

2.5 Metodología de investigación**2.5.1 Tipo de investigación.**

La investigación correlacional es un tipo de método de indagación no experimental que consiste en la relación o asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población (Hernandez et al., 2010). La presente investigación es del tipo correlacional puesto que tiene como propósito relacionar y vincular entre sí las características del diseño de mezcla del concreto permeable con su resistencia a compresión y la flexión.

2.5.2 Diseño metodológico.

Las fases del proyecto investigación documental se desarrollan de manera lógica y ordenada, así como de actividades para cumplirlos. Basados en redescubrir o reinterpretar diferentes aspectos de la aplicación de los concretos permeables, materiales y diseños para identificar vacíos, omisiones o tergiversaciones en las fuentes de referencia anteriores. Además

de ello es imprescindible establecer el periodo de tiempo en el cual se desarrollará cada fase y cada proceso que lo compone. Se presenta y se describe cada una de ellas:

2.5.2.1 *Etapas de planeación.*

En esta etapa se define la delimitación del tema y sus alcances: ¿Qué tan relevante puede resultar estudiarlo?, ¿Conviene estudiarlo? ¿Qué beneficios trae aplicar este tipo de concreto en nuestra vida diaria? Y se definirá cuáles son los recursos bibliográficos con los que dispone para esta investigación.

2.5.2.2 *Etapas de recolección de información.*

La información es recopilada de bases de datos científicas facilitadas por la Universidad de la Costa como lo son: Scopus, ScienceDirect, IEEE, Construdata, Scielo, Researchgate, de donde se extrajo toda la información de artículos científicos, para posteriormente realizar el estado del arte, marco teórico y antecedentes. Se seleccionaron 75 investigaciones sobre la tecnología de concreto permeable. Los criterios de selección para la información recolectada de artículos científicos, consiste en que no sea mayor a 5 años de antigüedad, es decir solo seleccionan artículos del año 2016, hasta el año 2020, los artículos escogidos exploren diseños de mezcla basados en la norma, *American Concrete Institute 522R-10 Report on Pervious Concrete* (2010). En la parte que concierne a la hidrología, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2019) contiene los datos históricos oficiales para el trabajo de investigación.

La recopilación del estudio se lleva a cabo en dos fases, una fase inicial donde se realiza una búsqueda por las diferentes bases de datos, recolectando artículos científicos con las palabras claves “*pervious concrete*”, “*mix design*”, “*natural aggregate*”, “*compressive strength*”.

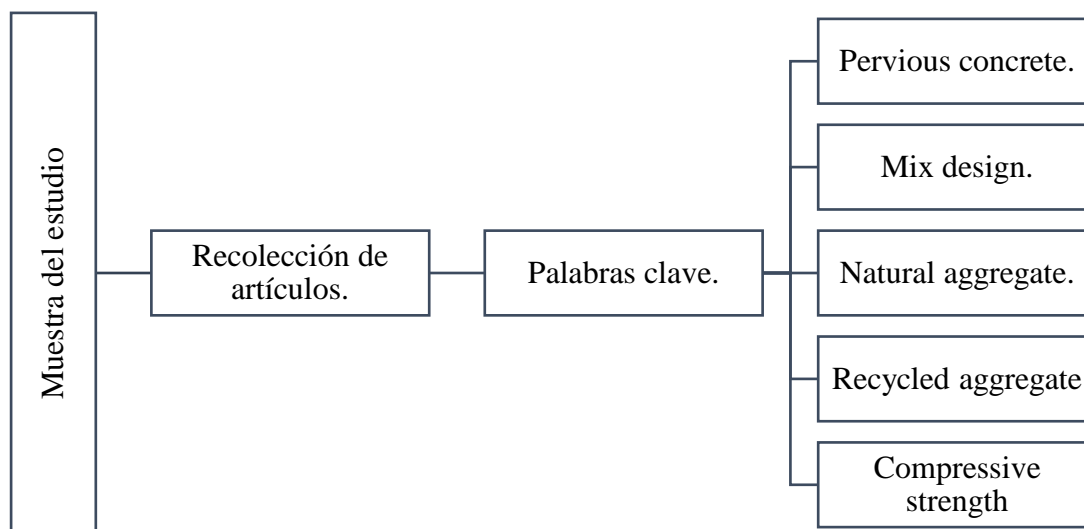


Figura 2.1 Recopilación de la primera fase de búsqueda. Fuente: Elaboración propia.

La segunda parte del presente estudio, consiste en la selección de artículos experimentales de revistas científicas colectados en la primera fase, donde solo serán seleccionados aquellos que posean un concreto permeable con un diseño de mezcla mediante el método de la ACI 522-R (2010), para así establecer relaciones o patrones numéricos en los diseños de mezcla con relación a la resistencia a compresión, flexión y permeabilidad.

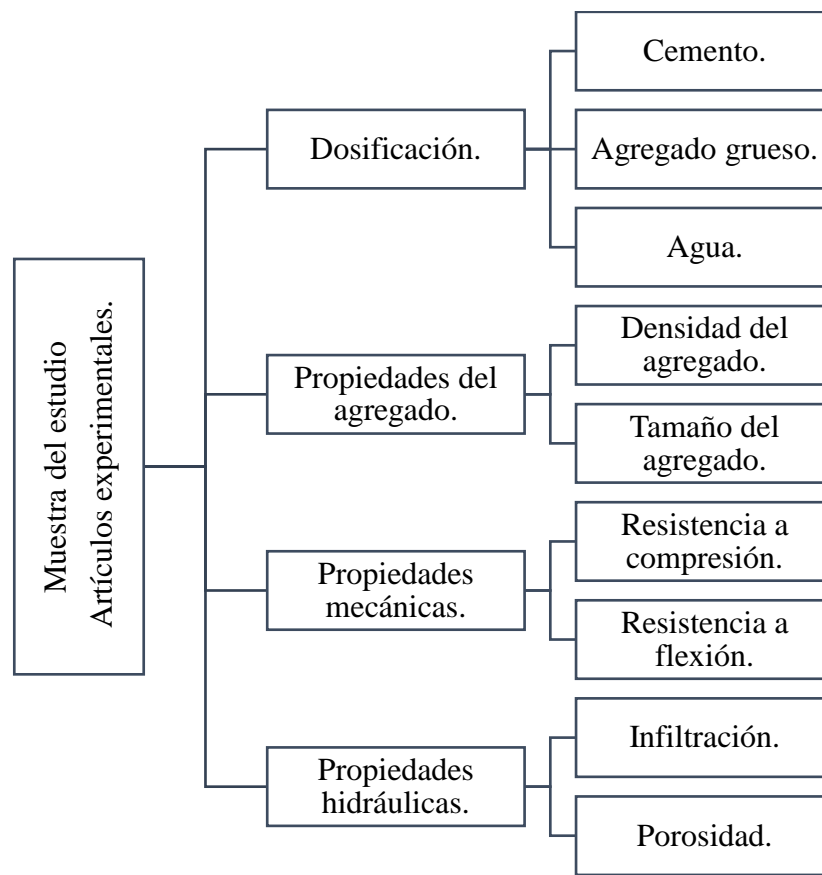


Figura 2.2 Recopilación de la segunda fase de búsqueda. Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda fase se posee una muestra de 50 diseños de mezcla de concreto permeable.

2.5.2.3 *Etapas de organización, análisis e interpretación.*

Se procede a desarrollar el contenido del documento, primero se organizaron todos los diseños de mezclas de los autores colectados en la anterior etapa. Esta información contenida es la siguiente: nombre la investigación, revista, año, autores, dosificación de cemento, dosificación de agregado grueso, dosificación de agua, densidad del agregado, absorción del agregado, granulometría del agregado grueso, tipo de agregado, tipo de aditivo, porosidad, relación agua cemento, resistencia a compresión en cubos y cilindros, resistencia a la flexión e infiltración.

Posteriormente se divide las investigaciones en dos grupos, uno llamado grupo A cuando su resistencia a la compresión sea igual o mayor a 21 MPa y otro grupo B cuando sea menor a 21 MPa.

2.5.2.4 *Etapas de presentación de resultados.*

Se presenta el documento final en el que se darán a conocer los resultados obtenidos respecto a la investigación.

2.5.3 Método de investigación.

El método de investigación aplicado es el cuantitativo, debido que el medio de prueba de los objetivos está basado en las mediciones numéricas y el estudio estadístico, para de este modo poder determinar y establecer patrones o modelos matemáticos que se asemejen y ajusten al comportamiento observado, de esta manera probar teorías respecto al diseño y aplicaciones de concreto permeable (Hernandez et al., 2010; Monje, 2011).

2.5.4 Limitación de investigación.

Desde el punto de vista de Ávila (2001, p 87), donde se señala que una limitación consiste en dejar de estudiar un aspecto del problema por alguna razón debidamente justificada. La principal limitación de la presente investigación fue la no realización de ensayos de resistencia a compresión, ensayos de resistencia a la flexión y permeabilidad. Todo esto se debe a la pandemia que afronta el mundo por el virus SARS-CoV-2, la Organización Mundial de la Salud (2020) en sus recomendaciones señala evitar sitios con alto índice de conglomeraciones. El Gobierno de Colombia (2019) suspendió las actividades académicas con el fin de mitigar y proteger a la comunidad frente al virus, las instituciones de educación superior también optaron por esa medida (El Tiempo, 2020a).

3 Marco referencial

3.1 Marco teórico

3.1.1 Concreto permeable.

3.1.1.1 *Definición.*

El concreto permeable o “Pervious concrete” (original en inglés) es un conjunto que consiste en tres elementos primarios: cemento, agregado grueso y agua, que al combinarse entre ellos da origen a un compuesto que funciona para la elaboración de pisos y pavimentos totalmente permeables. La poca o nula presencia de agregado fino le da la cualificación de tener una estructura porosa, consintiendo que el agua pase a través de la estructura, con lo cual se mitiga la acumulación superficial de aguas pluviales (Flores & Pacompia, 2015).

El concreto permeable generalmente no usa agregado fino, lo que origina una matriz de poros interconectados que ronda típicamente entre el 10% y 30%, de esta manera también se evita el coste de diseñar y hacer cunetas o canales para tratar las aguas. Otro aspecto muy importante de resaltar es que este concreto al tener una matriz de poros abiertos, no necesita o no es recomendable la aplicación de acero de refuerzo en las losas, porque estas barras quedarían expuestas al medio ambiente y en un periodo corto de tiempo estas perderán sus propiedades mecánicas (Calderon & Charca, 2011; Kayhanian et al., 2019).

3.1.1.2 *Ventajas y desventajas.*

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad. • Limpieza en su proceso constructivo. • Reduce efecto isla de calor. • No requiere acero. • Absorción acústica. • Favorece el ciclo del agua. • Antideslizante. • Evita el acuplano. • Retiene metales pesados. • Uso decorativo. | <ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento periódico. • Obstrucción de los poros. • Uso limitado a transito liviano. • Uso de aditivos para altas resistencias. • Uso no estructural. • Personal capacitado para su instalación. |

Figura 3.1 Principales ventajas y desventajas del concreto permeable. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.3 *Propiedades del concreto permeable.*

Los principales factores que definen las propiedades de concreto permeable son básicamente tres: materias primas, diseño de mezcla y proceso constructivo. Las materias primas como lo son típicamente el cemento, agregado grueso y agua; diseño de mezcla, que se haya ajustado correctamente a los materiales que tiene para que así logre una buena armonía entre estos y finalmente un proceso constructivo, donde no se afecte el diseño de mezcla con factores externos, teniendo en cuenta un buen vaciado y condiciones ambientales idóneas para de este modo no afectar la relación agua cemento, la pérdida de agregado, la energía de compactación y un correcto curado del concreto (American Concrete Institute, 1991).

3.1.1.4 *Propiedades en estado endurecido.*

a. Resistencia a la compresión.

IMCYC (2004) señala las cuatro principales propiedades del concreto y entre ellas se resalta la resistencia, para este caso se hablará de la resistencia a compresión, aplicable bien sea para concreto permeable o tradicional, que se definirá como el esfuerzo máximo o último que puede soportar un material, bajo una carga constante de aplastamiento antes que este falle y se creen deformaciones permanentes (Instron, 2020; National Ready Mixed Concrete Association, 2015).

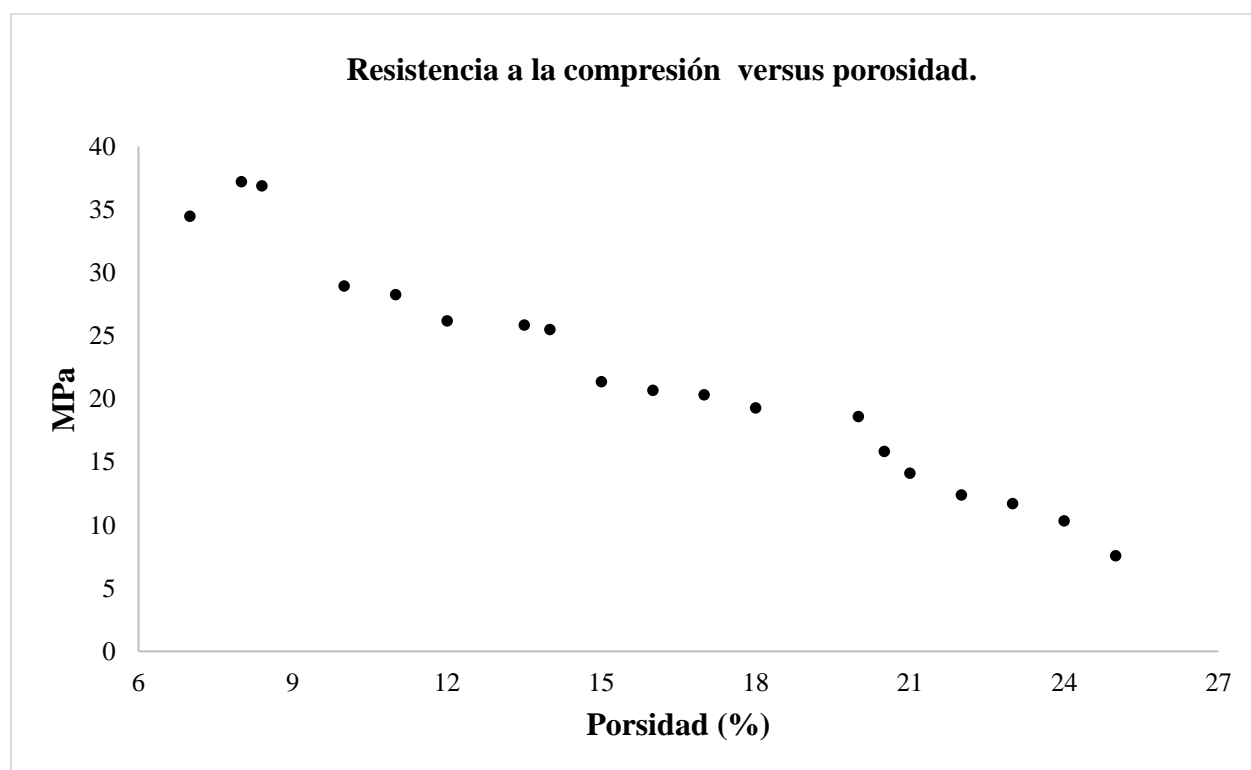


Figura 3.2 Resistencia a la compresión típica relacionada con la porosidad. Adaptada de: Meininger (1988).

Este gráfico relaciona la resistencias típicas del concreto permeable, sin aditivos o arena es decir sólo con tres elementos: cemento, agregado grueso y agua, con sus resistencias típicas a

compresión determinadas por Institute American Concrete (2010) en diferentes ensayos realizados.

Las mezclas de hormigón se pueden diseñar de tal manera que tengan una gran cantidad de variedad en sus propiedades, tanto mecánicas como de durabilidad que se adapten con los requisitos del proyecto. La resistencia a compresión del concreto es la forma de medida más usada para calificar el desempeño de un concreto que es implementado por los ingenieros para diseñar obras civiles. La resistencia a compresión se mide destruyendo probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión (NTC 673) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC, 2010). Se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi), y en el sistema internacional la unidad de medida es megapascuales (MPa).

“Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 2.500 psi (17 MPa) para concreto residencial hasta 4.000 psi (28 MPa) y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones, como lo son: puentes, viaductos, tanques, etcétera se especifican resistencias superiores hasta de 10.000 psi (70 MPa)” (National Ready Mixed Concrete Association, 2000).

b. Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión no es más que un parámetro del concreto que se mide bajo la magnitud de la resistencia a tracción del concreto, también se le conoce como resistencia a flexotracción, que es la carga última que soporta una viga de dimensiones normalizadas en la ASTM C293 (2006) las más usadas son de 6 x 6 pulgadas (150 x 150 mm) de sección transversal y con una luz mínima de 3 veces el espesor de la viga, este esfuerzo último resulta en lo que se

conoce como MR, módulo de rotura y la magnitud numérica maneja unidades del sistema inglés como el internacional, megapascuales y kilogramo fuerza respectivamente.

La resistencia a flexión típicamente comprende un 10% al 20% de la resistencia a compresión y todo depende del tipo de agregado grueso, dimensiones y volumen utilizado, no obstante, la mejor correlación para los materiales es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla (National Ready Mixed Concrete Association, 2006).

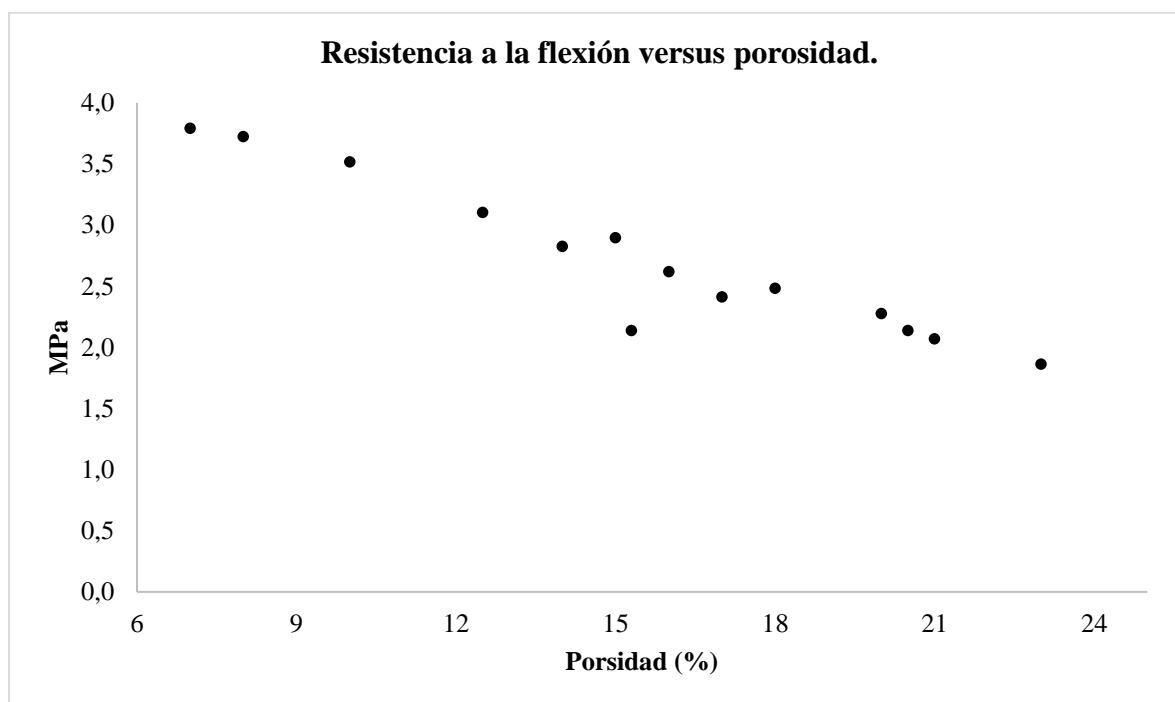


Figura 3.3 Resistencia a la flexión típica relacionada con la porosidad. Adaptada de: Meininger (1988).

La resistencia a la flexión en Colombia es determinada mediante la norma de ensayo NTC 2871 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC, 2004).

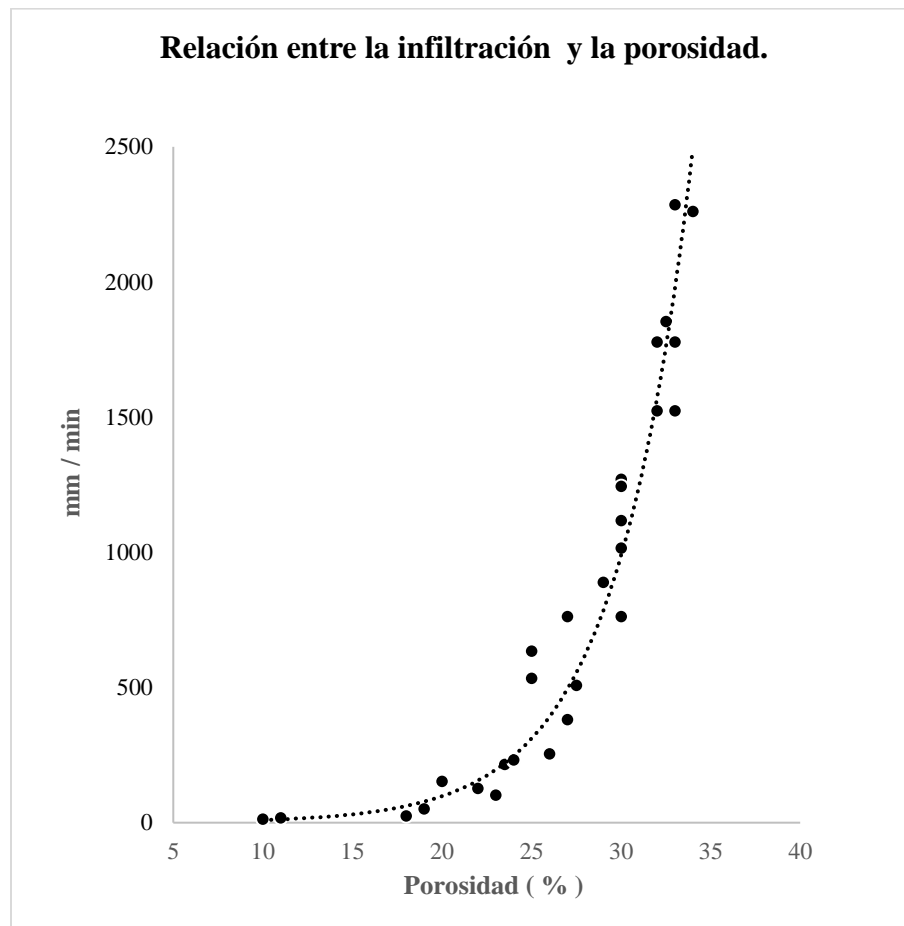
c. Permeabilidad.

Figura 3.4 Tasa de percolación versus contenido de vacíos. Adaptada de: Meininger (1988).

La permeabilidad es la característica distintiva del concreto permeable, como se observa en la *Figura 3.4* la tasa de infiltración es directamente proporcional a la porosidad, es decir a mayor porosidad mayor infiltración, otro aspecto a resaltar es que la porosidad se ve afectada con el tamaño máximo nominal del agregado, con un agregado menor a los 4,75 mm se logra porosidades por debajo del 10 % y tamaños mayores a 13 mm logra porosidades muy altas (Batezini & Balbo, 2015; Debnath & Sarkar, 2019).

Conocida como conductividad hidráulica hace referencia a la cantidad de agua u otras sustancias líquidas que tiene la capacidad de moverse entre los poros del material en un determinado tiempo. Se calcula experimentalmente en el laboratorio con un espécimen de volumen conocido donde la Ley de Darcy es aplicable (Montes & Haselbach, 2006; Valavala et al., 2006).

3.1.2 Materiales.

3.1.2.1 *Cemento.*

El cemento conforma el material aglomerante de la mezcla de concreto, este elemento constituye entre el 7% y el 15% del 100% (Remolina Durán, 2018), sin embargo esa pequeña cantidad logra entrelazar los demás materiales creando adherencia y cohesión que da origen a la resistencia a la compresión. El tipo de cemento utilizado principalmente para la producción de concreto es el cemento de tipo hidráulico y el más conocido de ellos es el cemento Portland. Se presenta una aclaración respecto a estas dos clases de cemento.

Cemento hidráulico: Cemento que fragua y endurece por la reacción química que sucede con el agua, tanto al aire como bajo agua, por esto se genera reacciones de hidratación, que también liberan calor de hidratación de sus constituyentes, dando lugar esto a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables (Quiroz & Osuna, 2006).

Cemento Portland: Es el producto que se obtiene de la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio, este admite la adición de otros productos siempre y cuando no afecte las propiedades del cemento resultante, NTC 31 (INCONTEC, 2017).

A pesar de las definiciones que se tienen del concreto, algunas fuentes afirman que el proceso de fabricación del cemento, y por ende sus componentes, han cambiado a lo largo de la

historia; Porrero (2014) afirma: El cemento o Portland que se usa hoy día como conglomerante es una cal hidráulica perfeccionada. Hidráulica quiere decir que tiene capacidad para endurecer tanto al aire como bajo el agua, sin la colaboración del anhídrido carbónico, como sucedía con las primitivas cales. Lo económico del material se debe a que las materias primas que emplea son relativamente abundantes en la naturaleza y las ventajas competitivas que ofrece frente a otros materiales de construcción.

a. Tipos de cemento Portland

En la medida en que varían los contenidos de los diferentes componentes del cemento se modifican a su vez las propiedades de este y los beneficios que se pueden lograr con su uso, en función también de los requerimientos de las obras civiles. Es por ello por lo que pueden existir diferentes tipos de cemento con el fin de satisfacer ciertas propiedades físicas y químicas para situaciones especiales. Ver Tabla 3.1 para la investigación se seleccionaron artículos con cementos tipo 1 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 2014).

Tabla 3.1

Tipos de cemento Portland

| Tipos de cementos Portland | | |
|----------------------------|--|--|
| Tipo | Denominación | Aplicación |
| Tipo 1 | Cemento Portland tipo 1. | Uso general el cual no exige propiedades especiales. |
| Tipo 1M | Cemento Portland tipo 1M. | Uso general el cual no exige propiedades especiales pero que maneja resistencias superiores al tipo 1. |
| Tipo 2 | Cemento Portland con adiciones. | Uso general en obras de hormigón, expuestas a la acción moderada de sulfatos y donde se requiera mayor calor de hidratación. |
| Tipo 3 | Cemento Portland con adiciones de escoria de alto horno. | Es el que desarrolla altas resistencias iniciales. |

| | | |
|--------|---|--|
| Tipo 4 | Cemento puzolánico. | Es el que desarrolla bajo calor de hidratación. |
| | Cemento compuesto. | Ofrece alta resistencia a la acción de sulfatos. |
| Tipo 5 | Cemento Portland con incorporación de aire. | Se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización. |
| | Cemento Portland blanco. | Se obtiene con materiales seleccionados que le otorgan su coloración. |

Nota: Tipos de cementos Portland. Adaptado de: (INCONTEC, 2014).

3.1.2.2 *Agregado grueso.*

El término agregado se refiere usualmente a un material inerte el cual es la derivación de la desintegración natural de las rocas y esta causa se da dependiendo el tipo de esta. Otra forma de generar agregados es mediante procesos donde interviene la mano humana y se da mediante explotación y trituración manual en las denominadas canteras en donde los procesos a los que se somete le permiten tener una textura, forma, resistencia y tamaño deseado.

Una definición del ministerio de minas de Colombia dice: Son todos aquellos materiales líticos que debidamente fragmentados y clasificados sirven para incorporarse a un hormigón (llámese asfáltico o hidráulico) para efectos básicamente de llenante o para ocupar un volumen; además, tienen utilidad en otros usos ingenieriles debido a sus características físicas como en enrocado de presas, obras de protección de costas y márgenes de ríos y mares. Hacen parte de los agregados las arenas, las gravas y los triturados (República De Colombia Ministerio De Minas Y Energía, 2003).

El agregado puede clasificarse según diversos criterios como su forma, su procedencia o su tamaño y la escogencia de ellos depende del uso que se le desee dar al agregado, por lo general para diseño de mezclas de concreto se tiende a clasificar por tamaños (en mm) del agregado.

Gravilla: Se denomina grava a las rocas sedimentarias detríticas producto de la división natural o artificial de otras rocas y minerales. Los fragmentos de la grava son aquellos que son retenidos 100% en el tamiz N° 4 o superior esto va respaldado por la NTC 32 (INCONTEC, 2002) y su composición química es variada. Está constituida principalmente por rocas ricas en cuarzo y cuarcita. También por clastos de caliza, basalto, granito y dolomita. Su uso y aplicaciones principalmente son: concretos estructurales, para todo tipo de obra de infraestructura y de vivienda. Cemex Colombia (2019) reporta el cumplimiento de las especificaciones internas. Numeral 10 nota 6. NTC 174 (INCONTEC, 2000).

Para la realización del diseño de mezcla de concreto permeable se toma como referencia una grava certificada por Argos Colombia (2019) de tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4"), con una densidad aparente que está en el rango de 2400 kg/m³ en su límite inferior y por parte del límite superior 2600 kg/m³ una absorción del 5% como valor máximo.

Tabla 3.2

Especificaciones del agregado grueso

| Característica | Norma de ensayo | Especificación acordada | |
|---|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| | | Límite inferior | Límite superior |
| Densidad (kg/m ³) | NTC 176 (INCONTEC, 2019) | 2400 | 2900 |
| Masa unitaria suelta (kg/m ³) | NTC 92 (INCONTEC, 2019) | 1300 | 1850 |
| Absorción (%) | NTC 176 (INCONTEC, 2019) | 0 | 5 |
| Máquina de los ángeles (%) | NTC 98 (INCONTEC, 2019) | 0 | 50 |

Nota: Estos datos representan un análisis estadístico de la conducta histórica del material ensayado en laboratorio y fue almacenado en una base de datos las cuales son revisados bajo la normativa actualizada. Adaptado de: (Argos Colombia, 2019).

Para el diseño del concreto permeable el comité de ACI 522-R (2010) recomienda diferentes tipos de tamaño de agregado que se pueden usar, bien sea No. 8 o No. 67.

Tabla 3.3

Recomendación del comité ACI

| Porcentaje de agregado fino | b/b _o | |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | ASTM C33/C33M tamaño No. 8 | ASTM C33/C33M tamaño No. 67 |
| 0 | 0,99 | 0,99 |
| 10 | 0,93 | 0,93 |
| 20 | 0,85 | 0,86 |

Nota: **b** Volumen de agregado grueso por m³ de concreto. **b_o** Volumen de agregado grueso por m³ de agregado grueso.
Tomado de: (Meininger, 1988).

Tabla 3.4

Gradación requerida para el agregado grueso

| N° | Tamaño nominal, aberturas de tamices | Cantidades retenidas en cada tamiz, porcentaje de masa que pasa. | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|--|-------------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | | 100 mm (4 in.) | 90 mm (3½ in.) | 75 mm (3 in.) | 63 mm (2½ in.) | 50 mm (2 in.) | 37.5 mm (1½ in.) | 25 mm (1 in.) | 19 mm (¾ in.) | 12.5 mm (½ in.) | 9.5 mm (¾ in.) | 4.75 mm (No. 4) | 2.36 mm (No. 8) | 1.18 mm (No. 16) |
| 2 | 63 a 37.5 mm (2½ a 1½ in.) | — | — | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | — | 0 a 5 | — | — | — | — | — |
| 3 | 50 a 25 mm (2 a 1 in.) | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | — | 0 a 5 | — | — | — | — |
| 357 | 50 a 4.75 mm (2 in. a No. 4) | — | — | — | 100 | 95 a 100 | — | 35 a 70 | — | 10 a 30 | — | 0 a 5 | — | — |
| 4 | 37.5 a 19.0 mm (1½ a ¾ in.) | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | — | 0 a 5 | — | — | — |
| 467 | 37.5 a 4.75 mm (1½ in. a No. 4) | — | — | — | — | 100 | 95 a 100 | — | 35 a 70 | — | 10 a 30 | 0 a 5 | — | — |
| 5 | 25.0 a 12.5 mm (1 a ½ in.) | — | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | — | — | — |
| 56 | 25.0 a 9.5 mm (1 a ¾ in.) | — | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 40 a 85 | 10 a 40 | 0 a 15 | 0 a 5 | — | — |
| 57 | 25.0 a 4.75 mm (1 in. a No. 4) | — | — | — | — | — | 100 | 95 a 100 | 60 a 80 | 25 a 60 | — | 0 a 10 | 0 a 5 | — |
| 6 | 19.0 a 9.75 mm (¾ a ¾ in.) | — | — | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | 0 a 5 | — | — |
| 67 | 19.0 a 4.75 mm (¾ in. a No. 4) | — | — | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | — | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | — |
| 7 | 12.5 a 4.75 mm (½ in. a No. 4) | — | — | — | — | — | — | — | 100 | 90 a 100 | 40 a 70 | 0 a 15 | 0 a 5 | — |
| 8 | 9.5 a 2.36 mm (¾ in. a No. 8) | — | — | — | — | — | — | — | — | 100 | 85 a 100 | 10 a 30 | 0 a 10 | 0 a 5 |

Nota: Adaptado de: AASHTO (2017).

3.1.2.3 *Agregado fino.*

Material que pasa 100% el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla N° 200. Generalmente es clasificado como arena gruesa o fina (INCONTEC, 2002). Agregado fino de origen natural, que encierran tamaños de grano de 1/16 a 64 mm (arenas y guijos, según la clasificación geológica de sedimentos por tamaño de grano). El material natural fino solamente debe ser tamizado. Arenas finas son implementadas como agregado, principalmente en el sector de la construcción a nivel mundial, para la fabricación de concretos, para el relleno de estructuras en obras civiles y edificaciones, la construcción de vías y otros (República De Colombia Ministerio De Minas Y Energía, 2003).

3.1.2.4 *Aditivos.*

Son sustancias químicas y en algunos casos, fibras de refuerzo que se adicionan al concreto. Además del agua, agregados, cemento hidráulico, son aplicados a la mezcla seguidamente antes o durante el mezclado. Son incluidos con el fin de modificar las propiedades del concreto bien sea en estado fresco, durante el tiempo de fraguado, para hacerlo más adecuado según el trabajo o exigencia dada y para que cumpla los requisitos y especificaciones particulares de cada tipo de estructura.

Las características logradas mediante la implementación de aditivos, que en muchos casos no se pueden lograr por otros métodos son: mejorar el desempeño de una mezcla de concreto ante determinadas situaciones. Asegurar la calidad del concreto en condiciones ambientales severas durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado (Cementos Argos, 2019). Los aditivos según la NTC 1299 (INCONTEC, 2008) se clasifican en: ver Tabla

Tabla 3.5

Tipos de aditivos

| Tipos de aditivos | | |
|-------------------|---|--|
| Clasificación | Función | Descripción |
| A | Plastificante. | Permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener una determinada consistencia del concreto. |
| B | Aditivo retardante. | Un aditivo que retarda el fraguado del concreto. |
| C | Aditivo reductor de agua. | Un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir concreto de una consistencia dada. |
| D | Aditivo reductor de agua, de alto rango. | Un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más. |
| E | Aditivo reductor de agua y acelerante. | Un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada y acelera el fraguado y el desarrollo de resistencia temprana del concreto. |
| F | Aditivo reductor de agua y retardante. | Un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada y retarda el fraguado del concreto. |
| G | Aditivo reductor de agua, de alto rango y retardante. | Un aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más y retarda el fraguado del concreto. |

Nota: Adaptado de (INCONTEC, 2008).

3.1.2.5 *Agua.*

El agua es un elemento esencial en las mezclas de concreto y morteros, pues permite que el cemento despliegue su capacidad ligante. Para cada cantidad de cemento existe una proporción de agua requerida para la hidratación del cemento; el excedente del agua tiene la función de solo aumentar la fluidez de la pasta, para que así esta pueda cumplir con la función de ligante y lubricante de los agregados finos y gruesos para que así se pueda obtener la trabajabilidad y manejabilidad adecuada (Orozco et al., 2018).

El agua sobrante es simplemente una masa que queda dentro de la mezcla y cuando se fragua el concreto esta es evaporada y lo que va a dejar son vacíos que reduce la resistencia, por eso cuando se requiere una mezcla bastante fluida se hace uso de aditivos plastificante; el agua utilizada en la elaboración del concreto debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas, todo esto está respaldado por la NTC 813 Agua potable (INCONTEC, 2013).

El material hidratante será el agua potable que está regida por la NTC 813 que debe cumplir con los siguientes parámetros:

Tabla 3.6

Concentración de elementos y sustancias químicas permitidas en el agua potable

| Sustancias | Símbolo | Valor permitido (mg/L) | | Productos Agroquímicos | |
|-------------------|-------------------|------------------------|-------|------------------------|----------------|
| | | Min | Máx. | Sustancia | Máx. (mg/L) |
| Arsénico | As | | 0,05 | Aldrín | 0,001 |
| Aluminio | Al | | 0,2 | Clordano | 0,003 |
| Bario | Ba | | 1 | Carbaril | 0,1 |
| Boro | B | | 1 | DDT | 0,05 |
| Cadmio | Cd | | 0,005 | Diazinón | 0,01 |
| Cianuro | CN | | 0,1 | Dieldrín | 0,001 |
| Cinc | Zn | | 5 | Endrín | 0,0005 |
| Cloruros | Cl | | 250 | Heptacloro | 0,03 |
| Cobre | Cu | | 1 | Lindano | 0,005 |
| Cromo hexavalente | Cr+6 | | 0,05 | Metoxicloro | 0,1 |
| Dureza total | CaCO ₃ | 30 | 150 | Metilparatión | 0,007 |

| | | | | |
|------------------|-------|---------------|---------------------|----------|
| Fenoles | Fenol | 0,001 | Paratión | 0,035 |
| Hierro total | Fe | 0,3 | Carbamatos | 0,1 |
| Magnesio | Mg | 36 | Toxafeno | 0,005 |
| Manganeso | Mn | 0,1 | Clorofenoxi 2,4D | 0,1 |
| Mercurio | Hg | 0,001 | 2,4,5T | 0,002 |
| Nitratos | NO3 | 45 | 2,4,5TP | 0,03 |
| Nitritos | NO2 | 0,01 | Radiactividad | |
| Plomo | Pb | 0,01 | Radio 226-228 | 5PCi/dm3 |
| Plata | Ag | 0,05 | Estroncio 90 | 2Ci/dm3 |
| SAB | SAB | 0,5 | | |
| Selenio | Se | 0,01 | | |
| Sulfatos | SO4 | 250 | | |
| Grasas y aceites | | No detectable | | |

Nota: Tomado de: (INCONTEC, 2013).

3.1.3 Herramientas y equipo.

3.1.3.1 Mezcladora.

Mezcladora de hormigón de caída libre (tipo tambor): es aquella que tiene un tambor que rota alrededor de un eje horizontal o inclinado y tiene habitualmente una serie de aspas ensambladas internamente. La operación de mezclado es efectúa cuando una porción de la carga es levantada mientras el tambor rota y, en un determinado punto de cada giro, cae hacia el centro del tambor, donde se mezcla nuevamente con otras partes de la carga en una secuencia continua hasta formar una mezcla homogénea NTC 1757 (INCONTEC, 2016).

3.1.3.2 *Moldes de vaciado.*

Los tipos de moldes pueden ser cilíndricos para ensayos de compresión y rectangulares para los ensayos de flexión todo está regido bajo la NTC 1377 (INCONTEC, 2010).

3.1.3.3 *Instrumento para medir la masa.*

Instrumento de medición que sirve para establecer la masa de un cuerpo implementando la acción de la gravedad sobre este cuerpo, también puede ser aplicado para determinar otras magnitudes, cantidades, parámetros o características relacionadas con la masa determinada. Este es utilizado cuando se prepara la dosificación, y poder cuantificar la masa necesaria de cada elemento, cemento, agregados grueso, fino, agua y aditivo. “De acuerdo con su método de operación, un instrumento de pesaje está clasificado como instrumento de pesaje de funcionamiento automático o no automático”. Todo eso y más información está en la NTC 2031 (INCONTEC, 2014).

3.1.3.4 *Varilla compactadora.*

Debe ser de acero, cilíndrica y su extremo compactador debe ser esférico con radio igual al radio de la varilla. Según el diámetro y longitud, la varilla compactadora puede ser de dos clases: Varilla compactadora corta – De diámetro igual a 10 mm (3/8") y aproximadamente 300 mm (12") de longitud y la otra Varilla compactadora larga – De diámetro igual a 16 mm (5/8"), y aproximadamente 600 mm (24") de longitud (Instituto Nacional de Vías, 1994).

3.1.3.5 *Martillo de Proctor.*

Martillo de compactación: Un mazo metálico que cuente con una superficie de cara totalmente plana circular de $50,8 \pm 0,127$ mm ($2 \pm 0,005$ ") de diámetro, una tolerancia por el uso que no supere los 0,13 mm (0,005") y que tenga una masa de $2,495 \pm 0,009$ kg ($5,50 \pm 0,02$ lb). El martillo deberá contar con una guía apropiada para así poder controlar la altura de la caída del

golpe, desde una posición libre de $304,8 \pm 1,524$ mm ($12,0 \pm 0,06''$ ó $1/16''$) sobre el nivel de la cota de altura del suelo. La guía deberá contar por lo mínimo con 4 orificios de ventilación, no menores de 9,5 mm ($3/8''$) de diámetro, espaciados aproximadamente a 19 mm ($3/4''$) de cada extremo, y deberá contar con la suficiente luz libre, de tal manera que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones (Instituto Nacional de Vías, 2013).

3.1.3.6 *Equipo misceláneo.*

Palas, palustres, reglas, guantes de caucho, regla de enrase o codal, rodillo de compactación manual, martillo debe ser de caucho, que pese $0,57 \pm 0,23$ kg. ($1,25 \pm 0,5$ lb) (Instituto Nacional de Vías, 1994). Para realizar la granulometría hay un juego de tamices que básicamente es un tejido de alambre que solo permite el paso de partículas de acuerdo al tamaño del tamiz y material a tamizar (INCONTEC, 2002).

3.1.4 Análisis hidrológico e hidráulico del concreto permeable.

El análisis hidrológico e hidráulico en cualquier obra de infraestructura es importante y son de los primeros estudios que se llevan a cabo en las fases preliminares, en el caso del concreto permeable juega un papel mucho más importante debido a que es la principal variable que está relacionada con la cualidad más sobresaliente del concreto permeable, como lo es la permeabilidad. Todo comienza con un proceso de estimación de cuál es el pronóstico de las precipitaciones futuras, para estimar cuál será la intensidad de agua que se requiere evacuar. La principal variable analizada es la precipitación, esta es una variable cuantitativa que es medida en estaciones meteorológicas.

La construcción de concretos permeable se debe empezar desde la caracterización hidrológica de la zona donde se piensa llevar a cabo dicho proyecto, los métodos que son usados comúnmente son aquellos que relacionan el periodo de retorno, la precipitación máxima en

horas, caudales pico, datos extremos todo esto con el fin de garantizar la funcionalidad del concreto permeable por un periodo como mínimo de 5 años, 10 años, 15 años que son los periodos de diseños críticos más aplicados actualmente (García, 2011).

3.1.4.1 *Estudios hidrológicos.*

La hidrología es una rama de la ciencia que se encarga de la indagación, investigación y predicción del agua que está presente en la atmósfera y también sobre la capa terrestre, esto envuelve variables como, precipitaciones, escorrentía, la humedad en el suelo y la evapotranspiración. En lo que relaciona al concreto permeable, los estudios hidrológicos desempeñan un papel indispensable debido que gracias a estos se pre-dimensiona el espesor de la capa de concreto permeable como también influye directamente en el diseño de mezcla más específicamente en la selección del tamaño nominal del agregado grueso y de la determinación de la porosidad de diseño (García, 2011).

La información hidrológica utilizada fue extradída del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2019). Los datos hidrológicos corresponden a la estación meteorológica Barranquilla/Ernesto Cortissoz (Colombia) que está localizada en las coordenadas N, 74 47W, 30 msnm los datos tomados corresponde al periodo que comprende desde el año 1950-01-01 hasta el 2018-12-31 para una muestra de 68 años de histórico hidrológico.

3.1.4.2 *Precipitación.*

La precipitación es una de las fuentes primarias de producción de agua dulce del mundo, no es más que la saturación de la atmósfera de vapor de agua, que esté al subir en la atmósfera se condensa y pasa del estado gaseoso al líquido y es cuando se precipita a la superficie terrestre. La

principal unidad de medida es (mm) lo que significa: Equivale a verter un litro de agua en un metro cuadrado y este litro va a tener una altura de 1 milímetro (García, 2011).

Los equipos de medición están instalados en la intemperie con la mayor libertad al medio, para así poder recibir las lluvias, rayos solares, dirección del viento, velocidad del viento. Entre otros factores el principal equipo de medición es el pluviómetro. Generalmente toma lecturas de cuánta agua ha colectado en 24 horas, ahí se reinicia el ciclo de recolección de información y pluviógrafos que son los que colectan la lluvia en milímetros contra tiempo, permitiendo determinar la intensidad de la precipitación (García, 2011).

3.1.4.3 *Infiltración.*

La infiltración sólo señala la cantidad de agua que pasa por la superficie. El flujo es insaturado y se extiende lateralmente a través del pavimento, de manera que el volumen del pavimento húmedo es mucho mayor que el volumen del pavimento directamente debajo del área de la prueba. Debido a este aumento de volumen, los valores de infiltración pueden ser mucho mayores que los de permeabilidad en el laboratorio. Posiblemente la mayor diferencia entre la permeabilidad y la infiltración es que la permeabilidad es un flujo saturado y la infiltración es un flujo no saturado (Kevern, 2015).

3.1.4.4 *Periodo de retorno.*

La estrategia convencional para el diseño, está relacionada con poseer un enfoque convencional que se basa en evacuar las aguas producto de precipitaciones fuera del entorno urbano lo más rápidamente posible a través de las redes de drenaje y sistemas de alcantarillado mediante el efecto de la interacción gravitatorio; para lograr este fin las estructuras son diseñadas para un caudal punta, un periodo de retorno determinado y unos factores de seguridad

proporcionales a las variables más impredecibles, todo esto con el fin, de lograr una capacidad hidráulica suficiente que evacue toda la precipitación.

Se plantean dos periodos para la selección de la lluvia de diseño (García, 2011).

- T = 5 años, si hacia aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada.
- T = 10 años, si no existe una red de drenaje bien desarrollada.

Aplicado en el mundo real lo más común de implementar dada su practicidad es asumir un tiempo de retorno para los proyectos de estructuras de infiltración, siendo típicamente un tiempo de 10 años plantea Woods-Ballard et al. (2007) por lo tanto, para el cálculo de intensidad del evento de diseño, el autor de la investigación asumirá un periodo de retorno de 20 años y un segundo periodo de 10 años para evaluar sus efectos en los diseños de mezcla.

3.2 Estado del arte

Las superficies de concreto reciben grandes volúmenes de aguas de lluvia que interrumpen el ciclo del agua y terminan desperdiciando al dirigirla directamente a los alcantarillados tratándola como agua residual. Los años 70 vieron nacer el concepto de concreto permeable en los Estados Unidos, el cual fue aplicado a superficies de aparcamientos y bajos tránsitos vehiculares, mientras que, a finales de la misma década, países de Europa como Francia, Inglaterra y Alemania, vincularon la nueva tecnología a sistemas de ahorro de agua haciendo uso del concepto en sus vías principales, convirtiendo sus ciudades en sistemas sostenibles (Calderon & Charca, 2011).

Durante los últimos 10 años el concepto de concreto permeable ha despertado gran atención debido a su capacidad de ahorrar recursos hídricos al mismo tiempo que representa una superficie apta para el tránsito; sin embargo, en Colombia es un tema poco explorado y por ende

poco aplicado. Por esta razón se planteó realizar la presente investigación que estudia la tecnología y aplicación del concreto permeable.

De manera exploratoria, y gracias a una búsqueda preliminar, en fuentes bibliográficas y en consultas con especialistas en el tema, se ha podido inferir que existen muy pocos proyectos de infraestructura vial realizados con concretos permeables, y los existentes los utilizan de forma parcial, de esta manera uno de los objetivos del presente documento, es establecer criterios para la utilización de nuevas tecnologías en diseño de pavimentos, donde el concreto permeable sea tomado como una opción oportuna, eficaz y eficiente (Moujir & Castañeda, 2014).

La evolución de toda sociedad, así como su constante desarrollo en los sectores productivos, económicos y de más, evidencian un fenómeno indetenible y de ritmo constante en gran parte de los países a nivel global, en especial los países de segundo orden o en vía de desarrollo. Más allá de los efectos positivos, este hecho se asocia, en el último siglo, con un crecimiento demográfico masivo, además de la expansión de la industrialización y urbanización Kisku et al. (2017) que genera a su vez una creciente demanda de hábitats y zonas urbanas impulsando así la inversión en el sector constructivo (Behera et al., 2014).

Los pavimentos de concreto permeable se han utilizado más a menudo como una tecnología de desarrollo de impacto ambiental mínimo, que ayuda a gestionar los efectos de la construcción y las operaciones de infraestructura en el entorno natural (Bruisnma et al., 2017; Rodríguez-Rojas et al., 2018; Scholz & Grabowiecki, 2007). Como una alternativa de infraestructura ecológica, el concreto permeable se puede implementar para integrar o sustituir la infraestructura convencional, especialmente para calles internas de la ciudad y superficies de estacionamiento que requieren baja velocidad, peso liviano y tráfico reducido de camiones (Cackler et al., 2006; Garber et al., 2011; Weiss et al., 2017).

En comparación con los concretos tradicionales, el concreto permeable tiene diferente proceso de construcción y las propiedades de los concreto convencionales son bastante diferentes en términos de materiales, métodos de construcción y equipos, especialmente desde las perspectivas económica y medioambiental. En relación con los pavimentos de concreto convencionales, los concreto permeables resultan en una disminución significativa en el consumo de cemento y agregado fino, por lo tanto, alivian la carga de las huellas ambientales. Los efectos de la evaluación del ciclo de vida indicaron que el dióxido de carbono emitido por el concreto tradicional es aproximadamente 903 kg de CO₂ por m³, mientras que la emisión de CO₂ del concreto permeable es de solo 19,5 kg de CO₂ por m³, es decir, aproximadamente equivale al 2% de la producción de hormigón convencional (Anastasiou et al., 2017).

Haselbach et al. (2014) concluyó que la concentración típica de aguas pluviales con metales como Cu y Zn disuelto puede eliminarse significativamente del curso natural a través de una capa de concreto permeable. Holmes et al. (2017) reveló que la supresión a largo plazo de metales pesados con concreto permeable se atribuye principalmente a que el metal cae entre los poros y no los deja seguir fluyendo aguas abajo. Lee et al. (2013) resaltó la reducción de las concentraciones de contaminantes, incluido el ácido sulfúrico y aceite de motor diluido en el agua de mar.

La pasta de cemento más material contaminante mostró una reducción muy considerable en la concentración de ácido sulfúrico. Además, el contenido de salinidad de la solución de agua de mar disminuyó considerablemente del 36% al 1% y el contenido de aceite disminuyó del 3% al 1%. Estas disminuciones de contaminantes fueron para un sistema de concreto permeable de 20 cm de espesor de losa que incluía una base agregada y una sub-base.

Stinson et al. (1997) resaltó otro aspecto como lo es la contaminación acústica. En los años 2009 y 2010, los niveles de ruido tradicionales en Canadá Ottawa oscilaron entre el espectro de los 100 y 110 dB para el concreto tradicional, una representación de este nivel de intensidad sería una motosierra, máquina de una imprenta, helicóptero, mientras que el concreto permeable varió entre 96 y 98 dB que equivaldrían a sonido percibido en una motocicleta, gritos o un restaurante lleno. La investigación de laboratorio que realizó Chu et al. (2017) reveló que el concreto permeable exhibe una mejor capacidad de absorción acústica que el concreto hidráulico tradicional, esto se debe a que la onda acústica es absorbida por los poros, mientras que en el tradicional la onda sufre el fenómeno ondulatorio de reflexión y es lanzada al medio hasta que un observador capte la onda.

Respecto a la capacidad de un concreto permeable para evacuar agua, es directamente proporcional a la porosidad, típicamente se encuentra entre el rango de 15% y 30% estadísticamente, el agua fluye a través de una capa de concreto permeable con tasas de 0,2 cm/s a más de 1 cm/s dependiendo de los materiales y la ubicación (Montes et al., 2005; Tennis et al., 2004). Valavala et al. (2006) señaló que esta tasa es mayor que la mayoría de las posibles tasas de precipitaciones. Además, las superficies de concreto permeable está muchas veces diseñada para tolerar tanto la lluvia directa (escorrentía pasiva) como la escorrentía de las áreas ascendentes (escorrentía activa), lo cual es la principal ventaja frente al concreto tradicional que tiene permeabilidad muy baja dado que la losa es maciza y no permite el paso del agua.

Hasta hace poco tiempo, no existía un método estándar disponible para medir o calcular aproximadamente la permeabilidad de los concretos. No obstante, *National Center for Asphalt Technology* (2019) desarrolló un permeámetro (ver *Figura 3.5 A*) que se aplica para la medición de la permeabilidad de los concretos permeables. La ASTM desarrolló el método estándar

ASTM C1701 (2009), (ver *Figura 3.5 B*) para medir la permeabilidad del concreto permeable.

La descripción detallada de en qué consiste cada uno de los métodos se puede obtener de (Kayhanian et al., 2009; Hui Li et al., 2013).

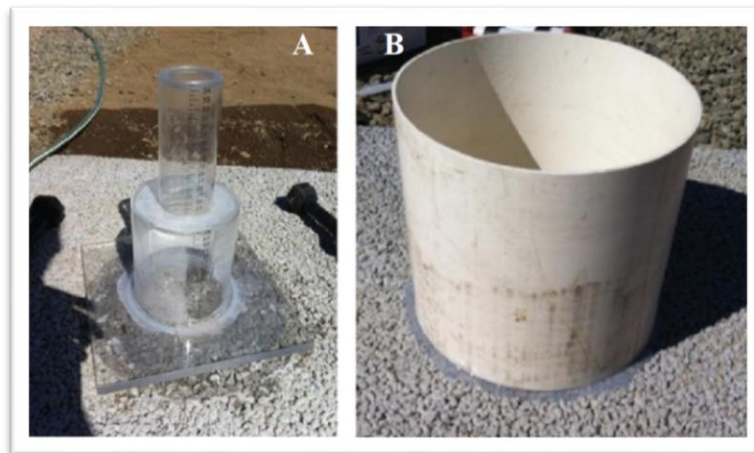


Figura 3.5 Los permeámetros ASTM C1701 (B) Y NCAT (A). Tomada de: Kayhanian et al. (2009)

Nota: el permeámetro NCAT (*Figura 3.5*) A generalmente viene con dos niveles cilíndricos, el más grande es para concreto altamente permeable y el más pequeño que se encuentra en la parte superior es implementado solamente para pavimentos de asfalto impermeables convencionales y no es necesario para concreto permeable.

La *Figura 3.5 A* consiste en el permeámetro basado en la NCAT (2019), con un diámetro de 146 mm y en la *Figura 3.5 B* el permeámetro regido por la ASTM C1701 (2009), son utilizados para mediciones de permeabilidad in situ de concreto permeables es decir los permeámetros son llevados donde se encuentra en servicio el CP.

Se presenta los parámetros más importante a mejorar que son la resistencia a compresión y a flexión del concreto permeable, para así poder aumentar la cantidad de obras con esta tecnología para ello se hizo una recopilación de investigaciones internacionales en las cuales se

analizan las propiedades mecánicas del concreto permeable, sus aplicaciones, recomendaciones de diseño y mantenimientos de estos; se presentan en dos conjuntos, un grupo “A” de alta resistencia donde se logró una resistencia a compresión mayor o igual a 21 MPa de este modo puede ser utilizado en un espectro mucho mayor que el segundo grupo que se nombra como grupo “B” de baja resistencia es decir menor a 21 MPa. En este momento se presenta el grupo “B” y sus respectivos resultados obtenidos ver *Figura 3.6*

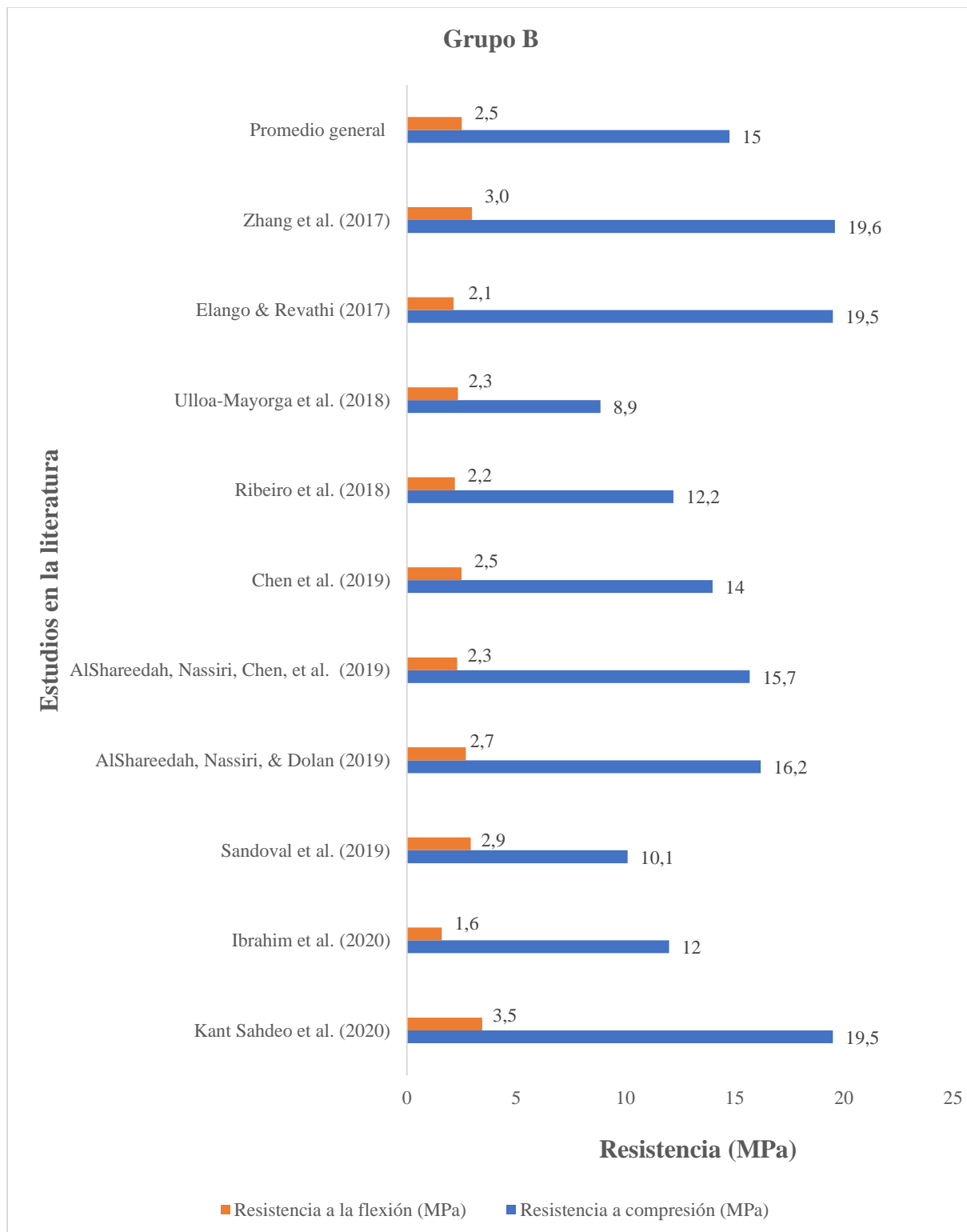


Figura 3.6 Revisión de la literatura, concreto de baja resistencia - Grupo B. Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 3.6* contiene 10 estudios diferentes con sus resultados obtenidos en compresión y flexión, cabe resaltar que se agregó otra etiqueta al eje vertical llamada “Promedio general” donde se obtiene la media de los diferentes diseños de mezcla.

Elango & Revathi (2017) reportó en su diseño el resultado de 19,5 MPa a compresión y 2,14 a flexión, aplicó una dosificación de 454 kg de cemento, 1500 kg de agregado grueso con una densidad de 2,76, absorción del 1% con un tamaño único de agregado de 8 mm con una relación agua cemento de 0,35 logrando una porosidad de 15,6% el agregado que se usó fue basalto angular. El siguiente estudio de Zhang et al. (2017) incorporo reemplazo parcial del material cementante de la siguiente forma 350 kg de cemento más 70 kg de ceniza volante, por parte del agregado grueso se aplicó 1520 kg de ladrillo rojo reciclado triturado con un límite superior de 10 mm y límite inferior de 5 mm una relación agua cemento de 0,28 debido a la aplicación de un aditivo reductor de agua en una dosificación de 4,2 kg por metro cúbico, dando como resultado una porosidad de 15,9% las propiedades mecánicas fue de 19,6 MPa a compresión y 2,98 MPa para flexión.

Ribeiro et al. (2018) en su estudio realizó solamente un diseño de mezcla, los resultados obtenidos de la aplicación de grava basáltica con granulometría que comprende de 2,4 mm hasta un tope de 9,5 mm y tiene como resultado a compresión 12,5 MPa y a flexión 2,2 MPa una porosidad calculada de 18,2%, una relación agua cemento de 0,35 otorgándole una baja resistencia, el diseño de mezcla fue el siguiente: cemento, 321,12 kg, agregado grueso 1284,48 kg para una infiltración de 0,16 cm/s.

El estudio de Ulloa-Mayorga et al. (2018) aplicaron un aditivo superplastificante al 0,3% del total de contenido de cemento, obtuvo 8,86 MPa a compresión y 2,33 MPa a flexión lo cual

los ubica como los autores con la resistencia más baja del grupo, esto se debe a que usaron un agregado reciclado de concreto con una granulometría entre el 9,5 mm y 12,5 mm y otro factor muy importante, fue la porosidad tan elevada obtenida 40,7 % un valor muy alto teniendo en cuenta que el rango ideal está entre 10% y 30% valores más altos dan resistencias muy bajas pero una infiltración y porosidad alta como en este caso que la infiltración es la más alta de ambos grupos con un 2,1 cm/s utilizaron una relación A/C de 0,30, el diseño de mezcla fue el siguiente: Cemento, 406,9 kg, agregado grueso reciclado 1433,4 kg.

Sandoval et al. (2019) señaló en su investigación los resultados de 10,1 MPa a compresión y 2,92 MPa para flexión, el diseño de mezcla estaba constituido de la siguiente forma: cemento 420 kg, 1369 kg de agregado de basalto con un tamaño único de 9,5 mm, densidad de 2,7 y una absorción del 0,49 % dando como resultado una porosidad del 24,8% relación agua cemento de 0,34 e infiltración de 1,052 cm/s.

AlShareedah, Nassiri, & Dolan (2019) presentó los siguientes resultados 15,7 y 2,3 MPa compresión y flexión respectivamente, mediante el siguiente diseño de mezcla: cemento 285 kg, 1640 kg de agregado grueso de basalto, con un tamaño único de 9,5 mm aplicó un retardante en una relación de 1 mililitros por cada 100 kg de cemento dando como resultado una porosidad de 19% y una relación agua cemento de 0,34 la infiltración del concreto permeable fue de 1,23 cm/s.

AlShareedah, Nassiri, Chen, et al. (2019) realizaron un nuevo estudio sobre el concreto permeable en este caso con el fin de elaborar un modelo de evaluación de fatiga del concreto permeable la dosificación fue la siguiente: 309 kg de cemento, 1640 kg utilizando piedra caliza para este estudio, tamaño único de agregado de 9,5 mm, porosidad obtenida de 20% con una relación agua cemento de 0,33 implementando 105 kg de agua potable, lo anterior mencionado

dio como resultado 16,2 y 2,7 MPa compresión y flexión respectivamente, teniendo una leve mejora que en su anterior estudio en las propiedades mecánicas.

El siguiente estudio fue dosificado de la siguiente manera: cemento 368 kg, agregado grueso 1602 kg grava, un tamaño de agregado único de 10 mm, 100 kg de agua en consecuencia a la aplicación de un aditivo reductor de agua de mediano rango, dando como resultado 14 MPa para compresión y 2,5 MPa para flexión y un coeficiente de infiltración de 0,29 cm/s (Chen et al., 2019).

Ibrahim et al. (2020) en su diseño de mezcla nombrado diseño F, reportó el uso 1300 kg de agregado grueso reciclado de concreto con una gravedad específica de 2,32 y una granulometría con límite inferior de 4,75 mm y límite superior de 10 mm, absorción del 8,05% los ensayos de compresión fueron realizados en especímenes cilíndricos de 100×200 mm, es de resaltar la inclusión de 130 kg arena de río, 329,9 kg de cemento, relación agua cemento de 0,4 resultando todo lo anterior en 12 MPa para compresión y 1,6 MPa para flexión.

Se presenta el último estudio del grupo B quien posee la resistencia a flexión más alta del grupo con 3,45 MPa y la segunda en compresión con el valor de 19,5 MPa el diseño fue nombrado por los autores como Diseño G2_0.35 está constituido por 1457 kg de agregado grueso natural con un límite inferior de 1,18 mm y un límite superior de 12,5 mm, 1,17% absorción, gravedad específica de 2,59 el diseño de mezcla estaba constituido por 364 kg de cemento, 127 kg de agua para una relación agua cemento de 0,35 resultando en una porosidad de 13% y una infiltración de 0,35 cm/s sin ninguna clase de aditivo (Kant et al., 2020).

A continuación, se muestra un gráfico con el resumen de los resultados sobre las investigaciones para la creación del grupo “A” que serán nuestros guías para realizar nuestro diseño de mezcla acatando sus recomendaciones y tratando de extraer de cada uno lo mejor, para

aplicarlos a nuestro proyecto, se detalla cada uno de los diseños de mezcla y se plasmará las notas como se mostró anteriormente. (ver *Figura 3.7*)

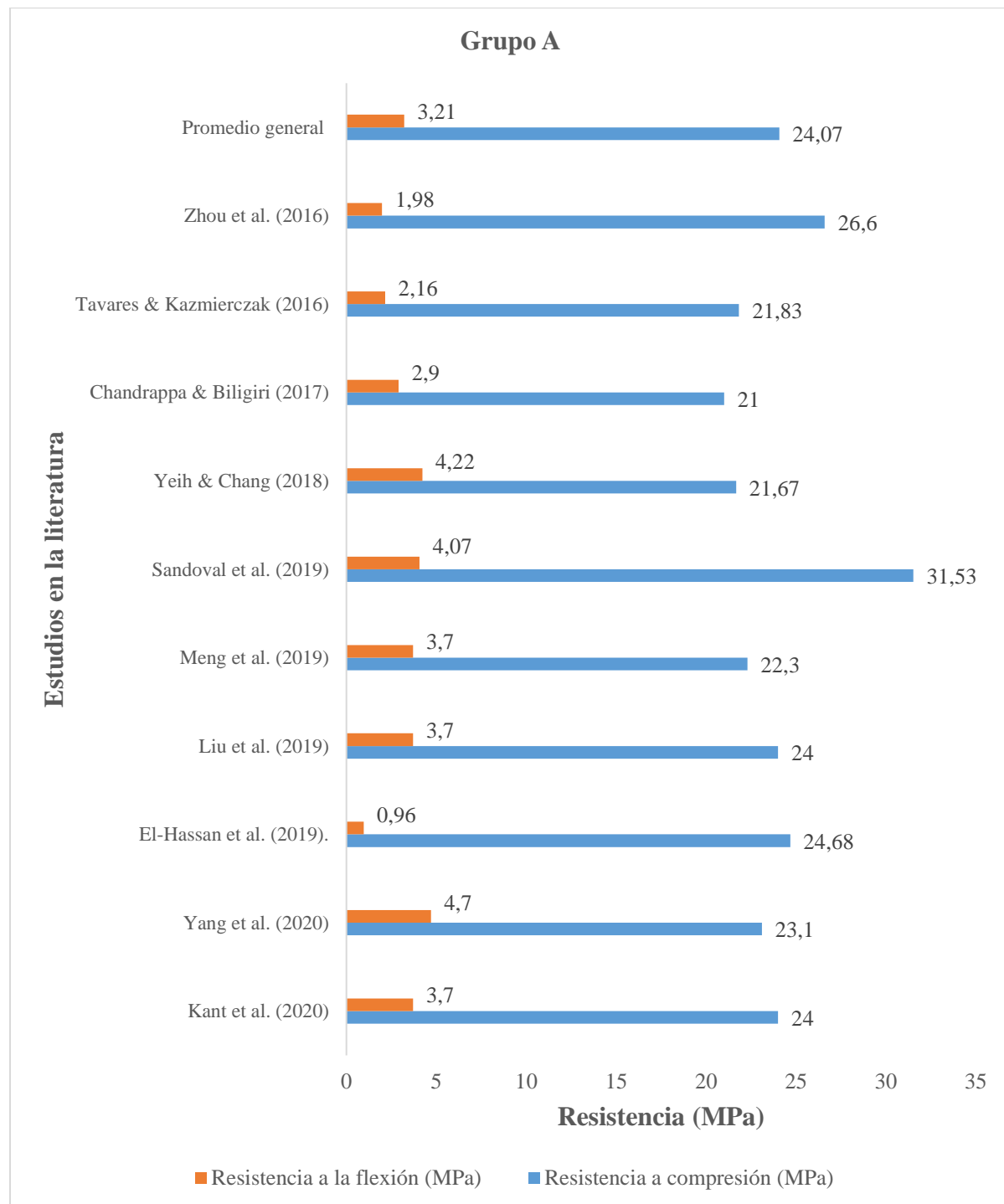


Figura 3.7 Revisión de la literatura, concretos de alta resistencia - Grupo A. Fuente: Elaboración propia.

Zhou et al. (2016) reporta en su investigación 26,6 MPa y 1,98 MPa para compresión y flexión respectivamente, su diseño es nombrado como: Diseño PPC-27.5 y aplicó una emulsión acrílica y policarboxílica 10% 8,84 kg, el agregado grueso utilizado fue basalto angular la dosificación se constituyó de la siguiente manera, cemento 276 kg, agregado grueso 1657 kg, tamaño único de 27,5 mm, logrando una porosidad de 28,9%, 88,4 kg de agua para una relación agua cemento de 0,32, la densidad del basalto fue de 2690 kg/m³.

Tavares & Kazmierczak (2016) en su diseño de mezcla aplicó una gravilla, de tamaño nominal 12 mm, una relación A/C de 0,33 y los resultados de compresión a los 28 días fueron para el diseño I de 21,83 MPa a compresión y a flexión 2,16 MPa se presenta como aceptable pero dado que usó un tamaño de agregado de 12 mm lo cual es considerablemente grande, resultando que logrará una baja resistencia a la flexión, la influencia que tiene el tamaño del agregado como factor de disminución es respaldada por (Yu et al., 2019). La dosificación aplicada fue la siguiente: cemento, 398 kg, agregado grueso 1307 kg infiltración de 0,50 cm/s.

Chandrappa & Biligiri (2017) logró 21 MPa a compresión y 2,9 MPa para flexión, el diseño se basó en una gradación del agregado grueso cuarteada de la siguiente forma 25% de 19 – 13,2 mm + 25% de 13,2–9,5 mm + 25% de 9,5–6,7 mm + 25% de 6,7–4,75 mm para un total de 1520 kg de gravilla, se incorporó un plastificante a base de lignosulfato al 0,2% de 380 kg de cemento, la relación agua cemento fue de 0,34 para 133 kg de agua, lo anterior mencionado resultó una porosidad de 20,2% el diseño de mezcla fue nombrado por los autores como diseño P6. EL siguiente estudio fue realizado por Yeh & Chang (2018) estaba constituido un diseño de mezcla con incorporación de escoria de horno de arco eléctrico como agregado grueso, con unos límites de 4,8 – 9,6 mm inferior y superior respectivamente, 631 kg de cemento, 220 de agua, y 1815 kg de escoria, adicionalmente el curado se llevó a cabo con agua de cal saturada, dando

como resultado 21,67 MPa a compresión y 4,22 MPa para flexión, la porosidad reportada fue de 10% y una infiltración de 0,55 cm/s, la mezcla fue nombrada en el documento como: diseño type I 90%.

Sandoval et al. (2019) reportó en su diseño 31,53 MPa a compresión y 4,07 a flexión, aplicó una dosificación de 350 kg de cemento, 2570 kg de agregado grueso, aplicando escoria de horno eléctrico con una densidad de 2,86, con un tamaño de agregado de 4 y 10 mm de límite inferior y superior respectivamente, con una relación agua cemento de 0,24 para 142,8 kg de agua, más 50 kg de resina polimérica, logrando una porosidad de 14%, la infiltración fue de 1,02 cm/s.

Meng et al. (2019) señaló en su diseño la aplicación de múltiples aditivos, superplastificante policarboxílico tiene una relación de reducción de agua con un valor del 25% que dio un total para el diseño de mezcla de 8 kg, se aplicó reemplazo parcial del material cementante resultando en 77 kg de cemento y 438 kg de ceniza volante, en el agregado grueso aplicado fue gravilla 1738 kg, límite inferior y superior de 5 mm - 10 mm respectivamente, 134 kg de agua, relación agua cemento de 0,26 la clave para que este diseño lograra 22,3 MPa en compresión, fue la incorporación de un reforzamiento con geomallas (*ver Figura 3.8*) mejorando la resistencia a la flexión con 3,7 MPa y una infiltración de 1,3 cm/s.

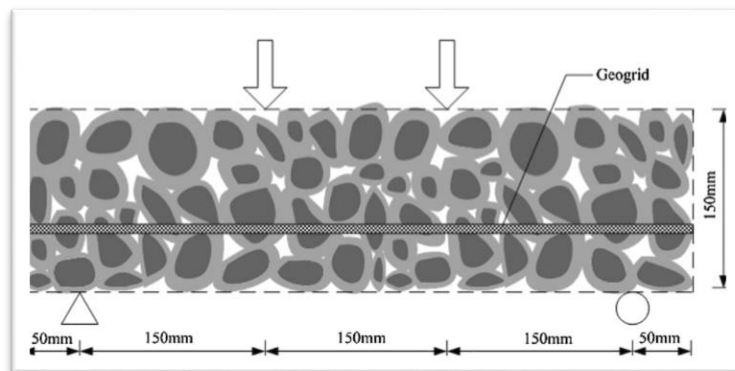


Figura 3.8 Ubicación de la geomalla en la viga. Tomada de: Meng et al. (2019)

Liu et al. (2019) manifestó la aplicación de agregado reciclado de concreto, en esta usaron una emulsión de polímero de silano para mejorar la resistencia del concreto permeable mientras se mantiene su permeabilidad, el diseño de mezcla fue el siguiente cemento 633 kg, agregado grueso 1392 kg límite inferior de 5 mm y superior de 10 mm, la relación agua cemento fue de 0,34 lo anterior resultó en una infiltración de 0,23 cm/s y la porosidad obtenida fue del 2,5% la más baja de todas, resistencia a compresión y la flexión de 24 MPa y 3,17 MPa respectivamente. El siguiente estudio de igual forma fue diseñado con agregado grueso reciclado de concreto 1325 kg con un tamaño único de 20 mm una densidad de 2,63 y absorción 6,63%, 500 kg de cemento, 200 kg de agua sin ninguna clase de aditivos químicos, el ensayo de compresión fue realizado en especímenes de 150×300 mm resultando en 24,68 MPa, para flexión dio la baja suma de 0,96 esto se puede deber al tamaño del agregado, porosidad de 14% e infiltración de 0,4 cm/s el diseño de mezcla fue etiquetado como P10-S0-R100 (El-Hassan et al., 2019).

El diseño control de Yang et al. (2020) se constituyó de 1622 kg de agregado discriminado en 77 kg de arena de río con tamaño único de 5 mm y 1545 kg de agregado grueso de basalto con un límite inferior de 5 mm y superior de 10 mm, 211 gramos de reductor de agua fue aplicado al diseño, 352 kg de cemento y 99 kg de agua la porosidad fue 20,2% y esta resultó en una infiltración de 0,5 cm/s, resistencia a compresión de 23,1 MPa y a la flexión de 4,7. Finalmente Kant et al. (2020) obtuvo 24 y 3,7 MPa para compresión y flexión correspondientemente su diseño de mezcla incorporó 1558 kg de agregado, discriminados de la siguiente forma 1402 kg de agregado grueso de basalto y 155 kg de arena de río lo que constituye el 10% del agregado, 383 kg de cemento y 136 de agua el límite inferior fue de 10

mm y el superior de 12,5mm la relación agua cemento fue de 0,35 la resistencia a compresión obtenida fue de 24 MPa para flexión fue de 3,7 MPa.

Hoy por hoy los concretos permeables son usados esencialmente en parques, senderos, andenes, pavimentos de tráfico liviano, parqueaderos, calles de urbanizaciones, etc. China es uno de los principales ejemplos del uso de este tipo de concreto, pero otros países como lo son Estados Unidos, México y Panamá han presentado grandes avances y se concentra en poder llevar la bandera de líderes en esta tecnología de aplicación del concreto permeable, se presentarán ejemplos de algunas obras en los países anteriormente nombrados (Argos 360, 2018).

Concreto permeable decorativo para los Juego Olímpicos de 2008, uno de los trabajos decorativos más llamativos realizados hasta hoy en día comprendió en los escenarios para los Juegos Olímpicos de 2008 en Beijing, China. "Suministramos una gran cantidad de maquinaria utilizada en los 2,7 millones de pies cuadrados de concreto permeable colocados para instalaciones olímpicas", dice Mitchell. "Ese trabajo tomó aproximadamente un año y medio, con 500 hombres viviendo en el lugar, 24/7" (Stacey Enesey, 2010).



Figura 3.9 Concreto permeable decorativo para los Juego Olímpicos de 2008. Tomada de: Concretedecor (2010).

Gran porcentaje del concreto permeable instalado para los Juegos Olímpicos radica en una capa superior de mezcla de agregado premium de color integral y otra mezcla de agregados grueso y cemento. Ambas capas mezcladas poseen alrededor de nueve pulgadas de espesor, la capa premium alrededor de dos pulgadas y la segunda de siete pulgadas (ver *Figura 3.10*).



Figura 3.10 Espesor de concreto decorativo juego olímpicos de Beijing, 2008. Tomada de: Concretedecor (2010).

Panamá, donde la empresa Hormigón Express S.A. (2018) desde el año 2009 está incentivando el reemplazo de algunas zonas recreacionales por un “concreto ecológico” como lo llama la misma empresa y así motivar a un desarrollo sostenible. También se han adentrado en la creciente construcción certificación LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), se añade la implementación de concretos permeables para perfeccionar el manejo de la escorrentía superficial. Actualmente este concreto se está utilizando en la construcción de áreas de tráfico peatonal, entradas de centros comerciales y plazoletas. ver *Figura 3.11* (A) y (B).



Figura 3.11 (A) Implementación de concreto permeable en plazoletas. (B) Utilización de concreto permeable en senderos peatonales, ambas fotos en Panamá. Tomada de: Hormigón Express S.A. (2018).

México quien reporta la aplicación del concreto permeable en varios estados como lo son Estado de Jalisco, Aguascalientes y Chiapas donde esta tecnología ha sido muy notoria por sus habitantes dado el “toque artístico y colorido” que han usado para estos, entre los proyectos más destacados se encuentra la Avenida Moctezuma de la ciudad de Guadalajara, Estado de Jalisco ver *Figura 3.12* (A), adicionalmente una obra en el Instituto de Vivienda del Estado de Aguascalientes *Figura 3.12* (B) y finalmente con una tonalidad de rojos se encuentran la plaza central de Soyaló en Chiapas *Figura 3.12* (C).



Figura 3.12 (A) Avenida Moctezuma (B) Instituto de Vivienda del Estado (C) Plaza central de Soyaló. Todas las fotos son en México. Tomada: Valdivia (n.d.).

Estados Unidos aplicó esta tecnología en el zoológico de Oregón, originalmente el Zoológico de Portland (2016) y más tarde el zoológico de Washington Park, es un zoológico ubicado en Washington Park, Portland, Oregón, aproximadamente a 2 millas al suroeste del centro de Portland. Se edificaron los andenes (ver *Figura 3.13*) aplicando concreto permeable presentando un camino rústico de hormigón permeable que serpentea a través de un terreno de rocas falsas. El plan fue creado con la intención de manejar adecuadamente la escorrentía superficial, cuestión muy importante en el diseño del zoológico debido a la topografía de la zona donde se encuentra ubicado.

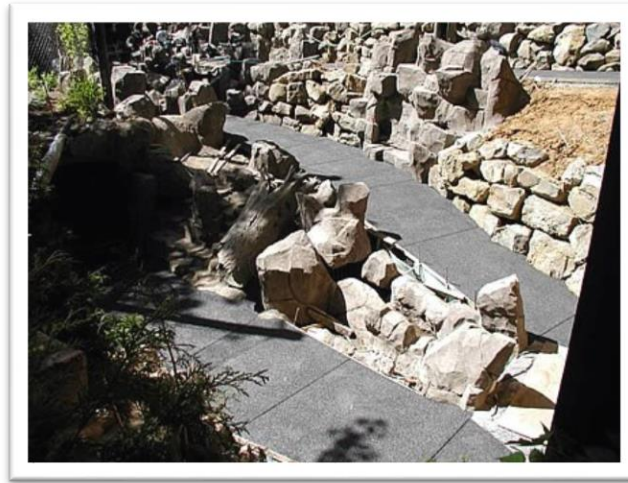


Figura 3.13 Exhibición de Eagle Canyon, zoológico de Portland, Oregón. Tomada de: The Concrete Network (n.d.)

3.2.1 Normatividad internacional.

A continuación, se comentan algunas normas que se hace necesario mencionar sobre qué otros criterios que existen a nivel mundial como lo son las normas europeas UNE (Una Norma Española). Se seleccionaron las normas relacionadas con la densidad del agregado y la absorción debido a que estos dos datos son los parámetros de entrada para diseñar bajo la normatividad del

ACI 522-R también se añadió la norma del ensayo a compresión debido a que se consideró importante saber cómo evalúan el desempeño de los diseños de mezcla.

3.2.1.1 *Densidad del agregado.*

Se realiza siguiendo los procedimientos establecidos en la norma UNE-EN 1097- 6 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua” Asociación Española de Normalización (AENOR, 2014). Esta cuenta con dos métodos que son:

- Método de la balanza hidrostática, para agregados que pasan por el tamiz de 63 mm y quedan retenidos en el tamiz de 31.5 mm.
- Método del picnómetro, para agregados que pasan por el tamiz de 31.5 mm y que quedan retenidos en el tamiz de 0.063 mm

No obstante, la propia norma UNE-EN 1097-6 permite la utilización del método de la balanza hidrostática como método alternativo al método del picnómetro con áridos entre 4 mm y 31.5 mm. Las muestras para analizar son:

- Arena
- Agregado grueso 4-8, fracción que pasa por el tamiz de 8 mm y que queda retenida por el de 4 mm.
- Agregado grueso 8-16, fracción que pasa por el tamiz de 16 mm y que queda retenida por el de 8 mm.

3.2.1.2 *Absorción.*

La absorción se obtiene mediante la norma UNE-EN 1097-5 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa.” Se obtiene la absorción de agua como porcentaje de masa seca tras

inmersión durante 24 es decir: $M1$ menos $M2$ dividido por $M2$ siendo $M1$ la masa del árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire y $M2$, es la masa en aire de la muestra de ensayo secada en estufa (AENOR, 2009b).

3.2.1.3 *Resistencia a compresión uniaxial.*

La determinación de la resistencia a compresión uniaxial se realiza de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3:2009 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas” (AENOR, 2009). En este ensayo las probetas se comprimen hasta lograr la falla del elemento en una máquina de ensayo de compresión conforme a la norma UNE-EN 12390-4 (AENOR, 2001), registrándose la máxima carga alcanzada por la probeta. El ensayo se realiza en especímenes cilíndricos de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, a una edad de 28 días y tras curado húmedo.

4 Metodología aplicada

4.1 Diseño de la investigación

Se realizó una revisión sistemática en bases de datos electrónicas de la literatura científica en Colombia y en otros países, para identificar cuáles son las materias primas principalmente utilizadas, la dosificación de los diseños de mezcla, para la elaboración de concreto permeable a nivel mundial (Monje, 2011).

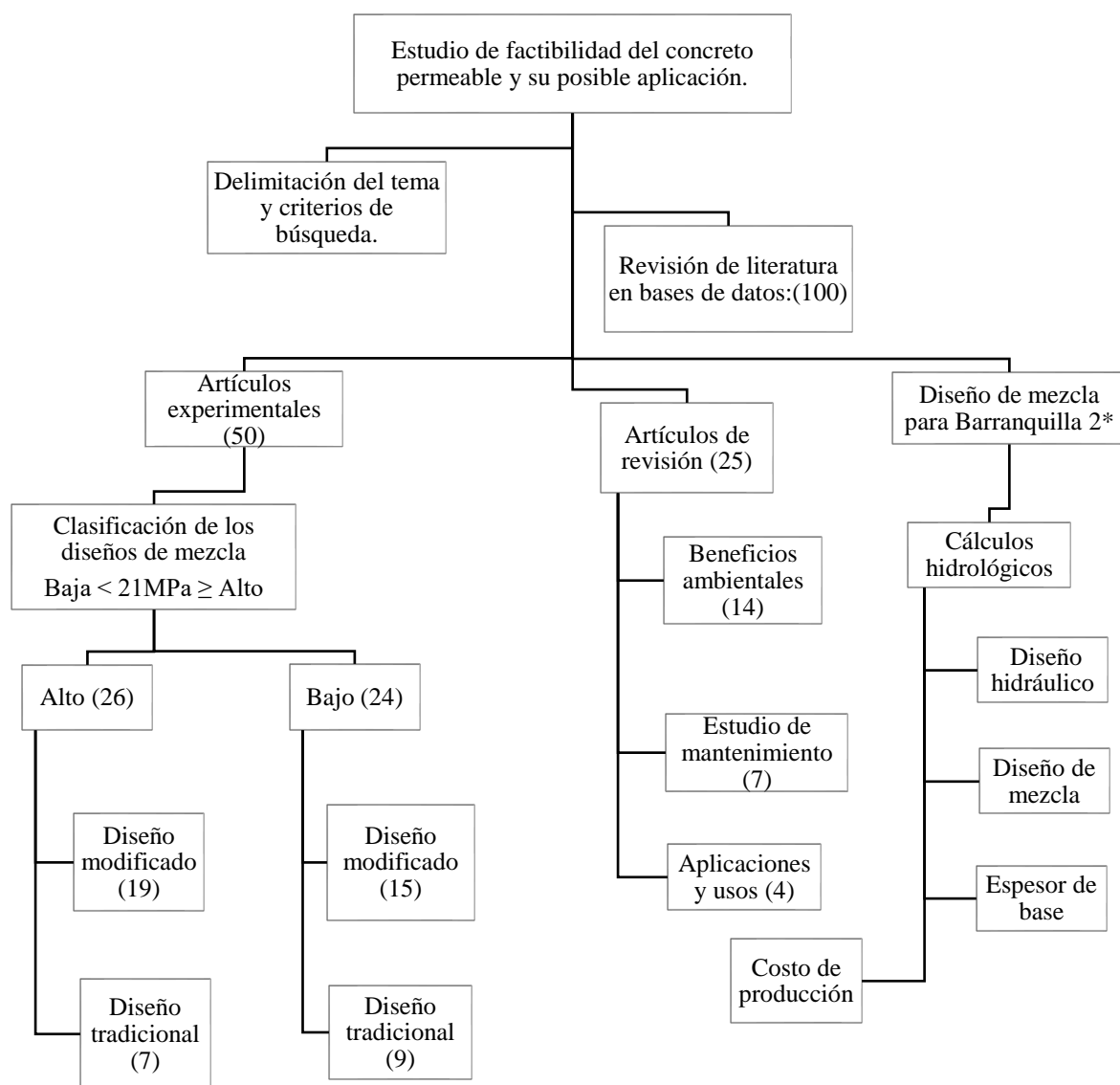


Figura 4.1 Organigrama general de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 4.1* se presenta la organigrama donde los números entre paréntesis corresponden a la cantidad de artículos científicos, es decir fueron revisados 100 artículos científicos de los cuales 25 fueron descartados por uso de cemento distinto al Portland tipo I, método distinto a la ACI 522-R (2010) fueron descartados, artículos que no detallará la dosificación fue descartado. Los artículos experimentales se dividieron en dos grupos para un mejor análisis con variables similares. Los artículos de revisión se presentan con el fin de establecer beneficios ambientales y poder analizar su factibilidad. Finalmente, la rama diseño de mezcla para Barraquilla contiene la propuesta de investigación. El número “2*” significa la propuesta de dos diseños de mezcla viables para Barraquilla producto de la revisión bibliográfica.

4.2 Diseño hidrológico

Para el diseño hidrológico del concreto permeable se busca en el histórico de datos hidrológicos un evento que posea una magnitud representativa y que sea reiterativo (Woods-Ballard et al., 2007). Es decir, T es un término estadístico que significa la probabilidad que suceda una posible superación una vez cada T años durante un registro largo. Esto no debe interpretarse en el sentido de que exactamente cuántos años hay entre inundaciones de cierto tamaño, sino como el intervalo en el cual potencialmente puede suceder un evento de alto impacto (Davie, 2008).

Para realizar el diseño hidrológico de la mejor manera se debe tener claro las limitaciones de los datos históricos hidrológicos con los que se cuenta, la cantidad registrada de meses y años, las observaciones de la estación meteorológica Ernesto Cortissoz son los utilizados en la presente investigación se obtuvo del IDEAM (2018), los datos disponibles al público son los siguientes:

- Precipitación 10 minotal total diaria fecha inicial 2017-01-01 fecha final 2019-12-31

- Precipitación acumulada 10 minutos fecha inicial 2016-12-31 fecha final 2019-12-31
- Precipitación total horaria medición cada 10 min fecha inicial 2017-01-01 fecha final 2019-12-31
- Día pluviométrico fecha inicial 1949-12-31 fecha final 2019-12-31

Para el diseño, se empieza con la recuperación de datos de la estación meteorológica Ernesto Cortissoz, la cual proporciona la información recopilada en los últimos 65 años que comprende desde el año 1950 hasta el 2018, se tomaron las precipitaciones máximas de cada mes y están expresadas en milímetros de agua, con una toma de las muestras de 24 horas, adicionalmente se trabajó con una sola décima, dado que los datos obtenidos así son expresados, fueron excluidos los años que tenían más de dos meses sin reporte pluviométrico que son los años 1949 – 1954 – 1956 – 1959 – 2019. Una vez tabulada la información de todos los meses se procedió analizar los datos y de cada año se extrae su valor máximo de precipitación que será llamado máx. mm/h y posteriormente se presenta un resumen (ver Anexo 1) de los datos de máximas precipitaciones en 24 horas en las últimas décadas en la ciudad de Barranquilla.

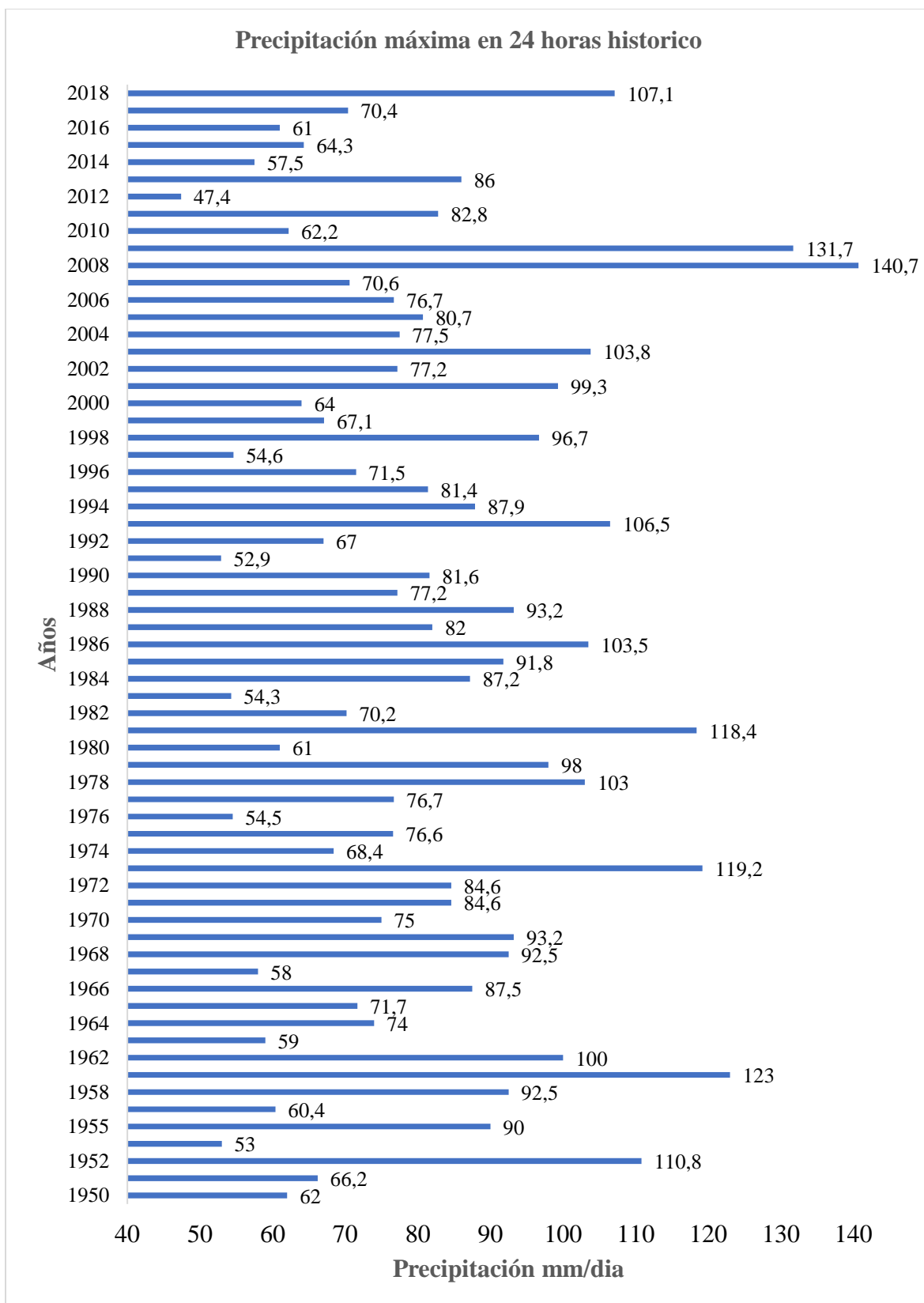


Figura 4.2 Resumen de lluvias máx. en 24 horas, últimos 65 años Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Criterios del diseño hidrológico

El método por el cual se trabajaron los datos hidrológicos fue mediante la estimación de las curvas IDF por método simplificado, este método debe ser aplicado siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración datos pluviográficos, y en este caso la información recaudada con la que se cuenta es del día pluviométrico (Instituto Nacional de Vías, 2008).

Se consideró un caso de encharcamiento producto de una precipitación, y además no se está considerando una cuenca en específica, cuyas características dictan el tiempo de concentración a escoger en estudios hidrológicos. Es importante señalar que se asume el tiempo de concentración en 1 hora debido a ser un caso de estudio, ya que el tiempo de concentración generalmente está asociado a las características de la cuenca Davie (2008), lo cual no aplica para la presente investigación, por ser un caso genérico. Igualmente, para compensar ese factor de incertidumbres, se toman en cuenta factores de seguridad propuestos por Woods-Ballard et al. (2007) que consiste aumentar la intensidad de lluvia desde 1.5 hasta 10 veces, de este modo tener un potencial rango mayor de seguridad.

4.2.2 Cálculo de curvas IDF por método simplificado.

El método es resultado de un estudio llamado “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia” (1998) es uno de los métodos recomendados por el “Manual de Drenaje de Carreteras” (2009) en esa investigación se calculó las curvas intensidad, duración y frecuencia mediante correlación entre la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual la elevación respecto al nivel del mar de la estación dando como resultado la ecuación (4.1).

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c} \quad (4.1)$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual.

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se muestra en la Tabla 4.1

Valores de ajuste por región

Tabla 4.1

Valores de ajuste por región

| Valores de los coeficientes de acuerdo con su región | | | | |
|--|-------|------|------|------|
| Región | a | b | c | d |
| Andina | 0,94 | 0,18 | 0,66 | 0,83 |
| Caribe | 24,85 | 0,22 | 0,50 | 0,10 |
| Pacífico | 13,92 | 0,19 | 0,58 | 0,20 |
| Orinoquía | 5,53 | 0,17 | 0,63 | 0,42 |

Nota. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF Fuente: Adaptada de: Díaz Granados (1998).

De los datos de la estación Ernesto Cortisoz se obtiene el siguiente resumen de precipitación máxima en 24 horas a nivel anual: Ver Tabla 4.2

Tabla 4.2

Estación Ernesto Cortisoz precipitación máxima anual histórica en 24 horas

| Años | Precipitación mm/día | Años | Precipitación mm/día | Años | Precipitación mm/día |
|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 1950 | 62 | 1976 | 54,5 | 1998 | 96,7 |
| 1951 | 66,2 | 1977 | 76,7 | 1999 | 67,1 |
| 1952 | 110,8 | 1978 | 103 | 2000 | 64 |
| 1953 | 53 | 1979 | 98 | 2001 | 99,3 |
| 1955 | 90 | 1980 | 61 | 2002 | 77,2 |
| 1957 | 60,4 | 1981 | 118,4 | 2003 | 103,8 |
| 1958 | 92,5 | 1982 | 70,2 | 2004 | 77,5 |
| 1961 | 123 | 1983 | 54,3 | 2005 | 80,7 |
| 1962 | 100 | 1984 | 87,2 | 2006 | 76,7 |
| 1963 | 59 | 1985 | 91,8 | 2007 | 70,6 |
| 1964 | 74 | 1986 | 103,5 | 2008 | 140,7 |
| 1965 | 71,7 | 1987 | 82 | 2009 | 131,7 |
| 1966 | 87,5 | 1988 | 93,2 | 2010 | 62,2 |
| 1967 | 58 | 1989 | 77,2 | 2011 | 82,8 |
| 1968 | 92,5 | 1990 | 81,6 | 2012 | 47,4 |
| 1969 | 93,2 | 1991 | 52,9 | 2013 | 86 |
| 1970 | 75 | 1992 | 67 | 2014 | 57,5 |
| 1971 | 84,6 | 1993 | 106,5 | 2015 | 64,3 |
| 1972 | 84,6 | 1994 | 87,9 | 2016 | 61 |
| 1973 | 119,2 | 1995 | 81,4 | 2017 | 70,4 |
| 1974 | 68,4 | 1996 | 71,5 | 2018 | 107,1 |
| 1975 | 76,6 | 1997 | 54,6 | | |

Nota. Resumen de precipitaciones históricas. Fuente: Elaboración propia

Se procede hacer un análisis de estadística descriptiva implementando la herramienta Excel.

Tabla 4.3

Resultados estadísticos

| Máx. precipitación anual mm/día | | | |
|---------------------------------|--|-------|-------|
| Media | $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ | (4.2) | 80,28 |
| Desviación estándar | $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (n_i - \bar{x})^2}{n}}$ | (4.3) | 22,25 |
| Coefficiente de asimetría | $A_s = \frac{\bar{x} - Mo}{DS}$ | (4.4) | 1,06 |
| Cuenta | n | | 29 |

Nota. Análisis con estadística descriptiva de las precipitaciones históricas anuales Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Σ = Sumatoria de todos los datos.

n_i = Datos.

\bar{x} = Media aritmética.

n = Número total de datos.

Mo = Modo.

DS = Desviación estándar.

Una vez se tiene todas las variables de la ecuación para el diseño de curvas IDF mediante el método simplificado aplicando la ecuación (4.1) y reemplazando los valores para crear el cuadro de intensidad duración el primer cálculo para un periodo de retorno de 2 año y una duración de 10 minutos sería de este modo:

$$a = 24,85$$

$$b = 0,22$$

$$c = 0,50$$

$$d = 0,10$$

$$t = 10 \text{ min}$$

$$T = 2 \text{ Años}$$

$$i = \frac{24,85 * 2^{0,22} * 80,28^{0,10}}{(10/60)^{0,50}} = 109,9 \text{ mm/h}$$

Se repite el proceso variando el tiempo de 10 minutos hasta 180 minutos aumentando de 10 minutos en cada iteración, una vez completado las 18 iteraciones es cambiado el periodo de retorno de 2 años a 5 años y se repite el proceso para los periodos de 10, 20, 50 y 100 años para completar el cuadro periodo de diseño (ver Tabla 4.4).

Tabla 4.4

Período de retorno en años (valores en mm/h)

| Tiempo (min) | Período de retorno (Años) | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 10 | 110,1 | 134,7 | 156,9 | 182,7 | 223,5 | 260,3 |

| | | | | | | |
|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | 77,9 | 95,2 | 110,9 | 129,2 | 158,1 | 184,1 |
| 30 | 63,6 | 77,8 | 90,6 | 105,5 | 129,1 | 150,3 |
| 40 | 55,0 | 67,3 | 78,4 | 91,4 | 111,8 | 130,2 |
| 50 | 49,2 | 60,2 | 70,2 | 81,7 | 100,0 | 116,4 |
| 60 | 44,9 | 55,0 | 64,0 | 74,6 | 91,3 | 106,3 |
| 70 | 41,6 | 50,9 | 59,3 | 69,1 | 84,5 | 98,4 |
| 80 | 38,9 | 47,6 | 55,5 | 64,6 | 79,0 | 92,0 |
| 90 | 36,7 | 44,9 | 52,3 | 60,9 | 74,5 | 86,8 |
| 100 | 34,8 | 42,6 | 49,6 | 57,8 | 70,7 | 82,3 |
| 110 | 33,2 | 40,6 | 47,3 | 55,1 | 67,4 | 78,5 |
| 120 | 31,8 | 38,9 | 45,3 | 52,7 | 64,5 | 75,2 |
| 130 | 30,5 | 37,4 | 43,5 | 50,7 | 62,0 | 72,2 |
| 140 | 29,4 | 36,0 | 41,9 | 48,8 | 59,7 | 69,6 |
| 150 | 28,4 | 34,8 | 40,5 | 47,2 | 57,7 | 67,2 |
| 160 | 27,5 | 33,7 | 39,2 | 45,7 | 55,9 | 65,1 |
| 170 | 26,7 | 32,7 | 38,0 | 44,3 | 54,2 | 63,1 |
| 180 | 26,0 | 31,7 | 37,0 | 43,1 | 52,7 | 61,4 |

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar la tabla intensidad, duración y frecuencia, se grafica el tiempo en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas las precipitaciones para generar el gráfico de las curvas IDF como lo muestra la *Figura 4.3*

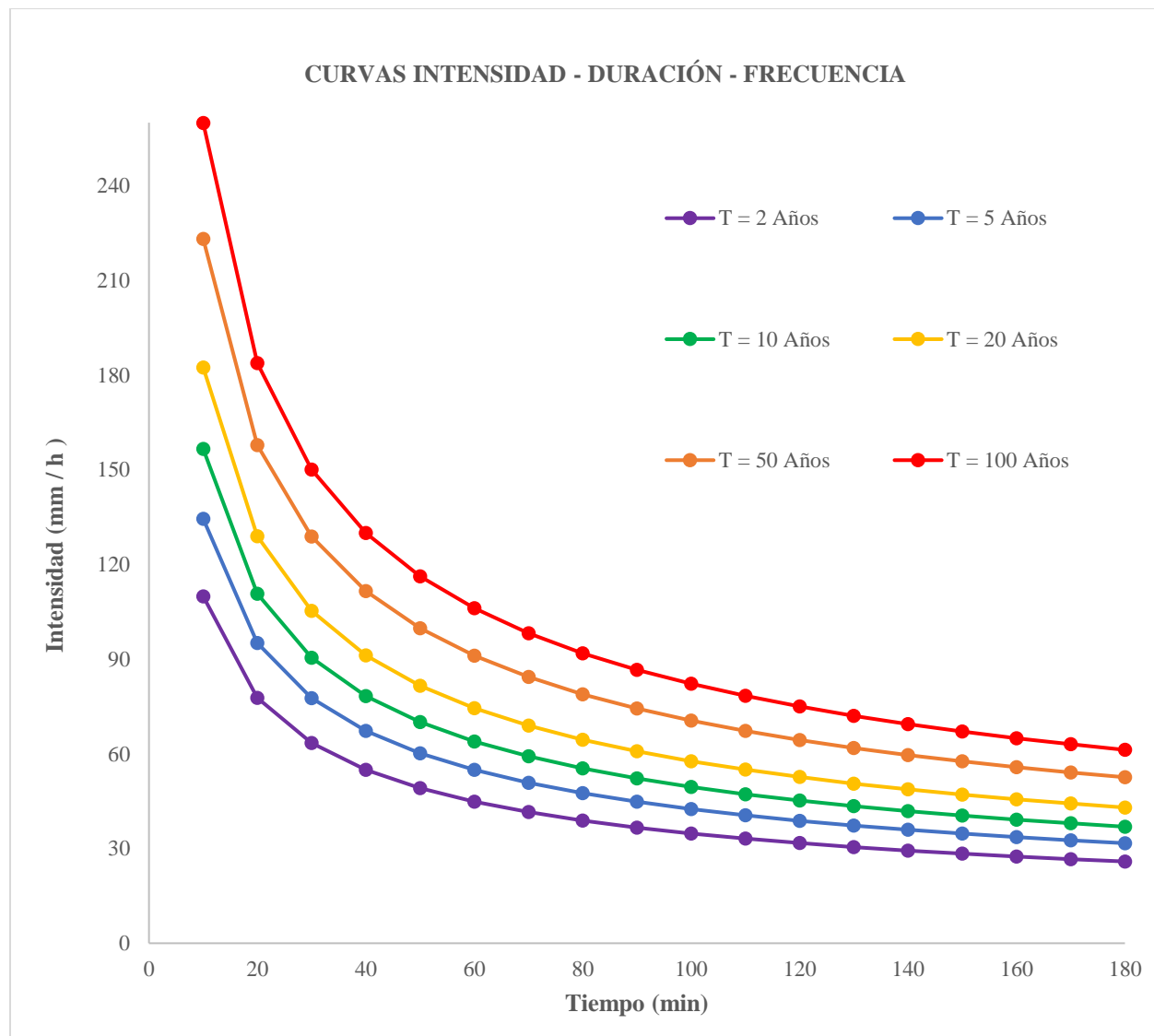


Figura 4.3 Curvas IDF para la ciudad de Barranquilla. Fuente: Elaboración propia.

La lluvia de diseño fue calculada gracias a datos oficiales disponibles en el sitio web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, agencia del gobierno de Colombia y corresponde a los eventos de lluvia registrados desde 01-01-1950 hasta 2018-12-31 excluyendo los años 1954, 1956 y 1959 debido a que presentaban algunos meses sin reporte de día pluviométrico, la lluvia de diseño fue calculada bajo el Manual de Drenaje para Carreteras capítulo 2 (INVIAS, 2009).

4.2.3 Diseño hidráulico.

4.2.3.1 *Diseño hidráulico N1.*

Para diseño hidráulico, el autor de la investigación asumió un periodo de retorno de 20 años, a pesar que un T10 sería algo tradicional, pero esto se debe a que la ciudad de Barranquilla se encuentra muy próximo al mar caribe donde anualmente se presentan la temporada de huracanes, y esto hace que el invierno en Barranquilla presenta fuertes precipitaciones, con velocidades de vientos considerables y esos vientos transportan nubes que se precipitan en Barranquilla de forma muy violenta, dado a este factor se optó por un periodo de diseño más conservador de 20 años, para de esta forma poseer un factor de seguridad mucho más amplio que con un T10 y de este modo garantizar la infraestructura por un tiempo mayor.

Los valores de entrada son:

$$T = 20 \text{ años}$$

$$t = 60 \text{ min}$$

$$I = 74,6 \text{ mm/h}$$

Woods-Ballard et al. (2007) señaló otro factor de seguridad, recomendando aumentar la intensidad de la precipitación que está en un rango desde 1,5 hasta 10. Para este estudio se optó por el valor de 3, dado que en el criterio de diseño el periodo de retorno considerado fue de 20 años, que es el doble de un periodo tradicional T de 10 años. Teniendo en cuenta estos valores y recomendaciones, el nuevo valor calculado para la intensidad de diseño fue de:

$$I = 223,8 \text{ mm/h}$$

Con este valor se ingresa en la *Figura 3.4* para seleccionar la porosidad de diseño recomendada por el comité de la ACI 522-R, la cual relaciona los contenidos vacíos y la

infiltración típica del concreto permeable. Se aplica la ecuación (4.5) logarítmica mostrada en la *Figura 3.4*.

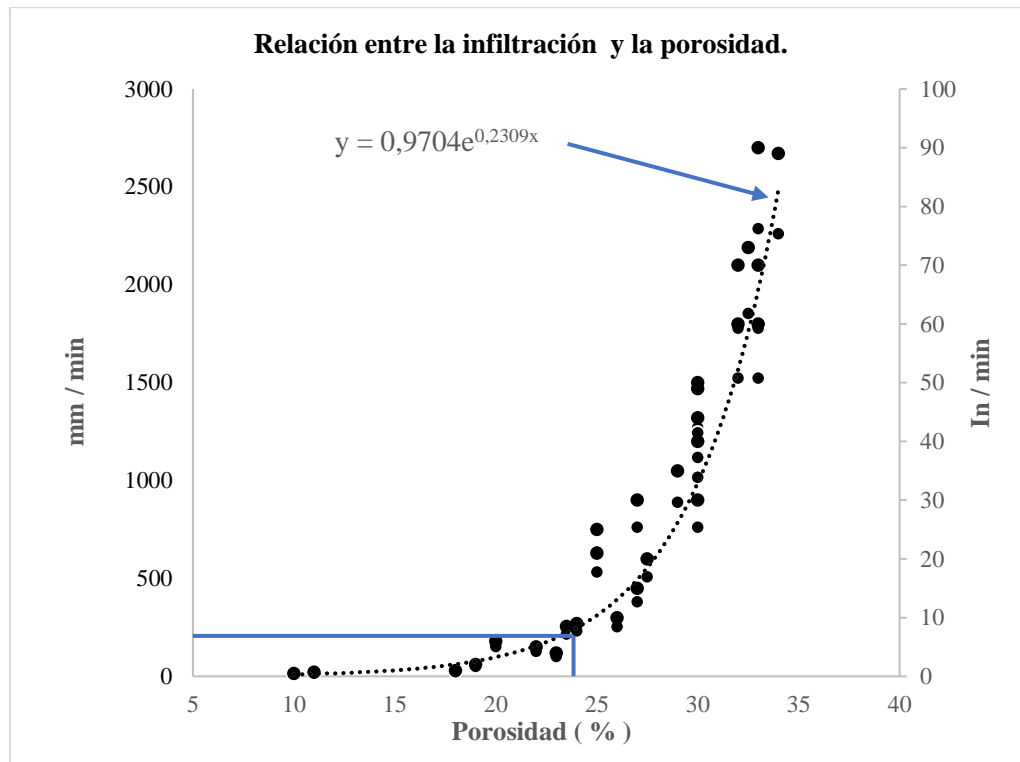


Figura 4.4 Selección de contenido de vacíos. Adaptada de: Meininger (1988).

$$f(x) = 0,9704 e^{0,2309x} \quad (4.5)$$

Se procedió a igualarla con la intensidad de la precipitación ya que es el valor conocido, para así calcular de manera más aproximada la porosidad requerida, dado que en el gráfico existen valores dispersos (ver *Figura 4.4*) lo cual dificulta tener la certeza de seleccionar la porosidad requerida. La ecuación quedó de la siguiente manera ver (4.6).

$$223,8 = 0,9704 e^{0,2309x} \quad (4.6)$$

La porosidad de diseño es de $23,5634461 \approx 24\%$ de vacíos.

4.2.3.2 *Diseño hidráulico N2.*

El diseño N2 será un poco menos conservador con el cálculo de la intensidad de diseño, ya que busca que el concreto presente teóricamente una reducción de poros para así estimar cuál sería su resistencia teórica alcanzada, sin embargo el diseño debe cumplir con los parámetros establecidos en el comité de la ACI 522-R (2010), el nuevo periodo de retorno que se asumió para el segundo diseño es el recomendado por García (2011) que es de $T = 10$ años cuando se carece de una red de drenaje desarrollada, este nuevo periodo es ubicado en las curvas IDF (ver *Figura 4.3*) y se tomará una duración de 1 hora, dando como resultado los siguientes datos.

Lo valores de entrada son:

$T = 10$ años

$t = 60$ min

$I = 64$ mm/h

Para el factor de Woods-Ballard et al. (2007) se optó por el valor mínimo de 1,5 resultando en la nueva intensidad de diseño:

$I = 96$ mm/h

Este valor es reemplazado en la ecuación (4.5) para hallar la nueva porosidad teórica de diseño y queda como indica la ecuación (4.7)

$$96 = 0,9704 e^{0,2309x} \quad (4.7)$$

Segunda porosidad de diseño $19,8977 \approx 20\%$ de vacíos.

4.2.4 Diseños de mezcla para la ciudad de Barranquilla.

El procedimiento de diseño es bajo las recomendaciones del comité ACI 522-R (2010) pero se empezó por la sección de infiltración del concreto permeable, que fue calculada en el capítulo (4) en su título (4.2) dando como resultado el valor de la intensidad de lluvia más factores de seguridad de 223,8 mm/min y una porosidad de diseño de 24%, seguidamente la selección del agregado grueso se debe recordar el título (3.1.2.2) donde fueron resaltadas las propiedades del agregado certificado por Argos Colombia (2019), (ver Tabla 3.2), para la densidad fue tomado el valor ponderado, es decir 2650 kg/m^3 y para el peso específico el valor de 1471 kg/m^3 (Cristián Gaedicke et al., 2016).

Peso específico = 1471 kg/m^3

Gravedad específica = 2,65

Absorción = 5%

Granulometría del agregado grueso = 19,0 a 4,75 mm (3/4 in. a No. 4) No. 67.

Los pasos para el diseño de mezcla son los siguientes:

- 1) Tener una porosidad objetivo.
- 2) Determinar el tipo de agregado grueso y el tamaño máximo a usar.
- 3) Peso específico del agregado grueso.
- 4) Ajuste del agregado SSD (*Saturated surface dry*).
- 5) Seleccionar el volumen de pasta.
- 6) Seleccionar relación agua cemento.
- 7) Determinar el contenido de cemento.
- 8) Determinar el contenido de agua.
- 9) Determinar el volumen de los sólidos.

10) Revisar el contenido de poros.

4.2.4.1 *Diseño de mezcla N1.*

1) Porosidad de diseño 24 %

2) Grava ensacado argos $\frac{3}{4}$ ''

Se ingresa en la Tabla 3.3 y se observó que para un tamaño 67 da una relación de vacíos por metro cúbico de 0,99 y cero agregados finos.

3) Peso específico = 1471 kg/m³ ajustado por la ecuación (4.8)

$$W_a = P.E. * b_o * 1m^3 \quad (4.8)$$

$$W_a = 1471 \text{ kg/m}^3 * 0,99 * 1 \text{ m}^3$$

$$W_a = 1456,29 \text{ kg}$$

4) Ajuste del agregado grueso.

$$w_{ssd} = w_a * \text{Absorción} \quad (4.9)$$

$$w_{ssd} = 1456,29 \text{ kg} * 1,05$$

$$w_{ssd} = 1529,10 \text{ kg}$$

5) Seleccionar el contenido de pasta, para este paso es recomendable apoyarse en la *Figura 4.5* donde se ingresa con el valor de 24% de contenidos de vacíos calculado en la ecuación (4.6) dado que el agregado fue ensayado por “*dry rodded density*” se selecciona ligeramente compactado, dando como resultado un 18% de contenido de pasta para el primer diseño de mezcla, la NTC 92 sería el

homólogo en Colombia bajo el título de “Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados” (ICONTEC, 2019).

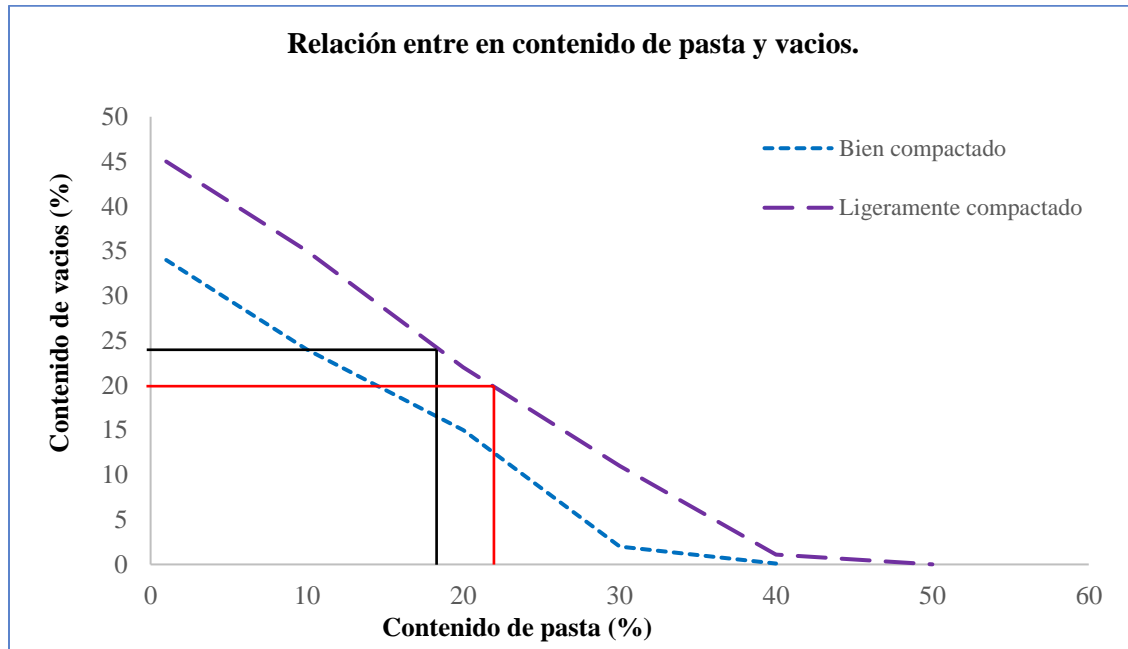


Figura 4.5 Relación entre el contenido de pasta y porosidad. Tomado de: Meininger (1988).

- 6) Para la relación agua cemento es necesario la ayuda de la *Figura 4.5* donde se observa distintos tipos de agregado, es buscado el No 67 y este da aproximadamente una relación agua cemento de 0,40

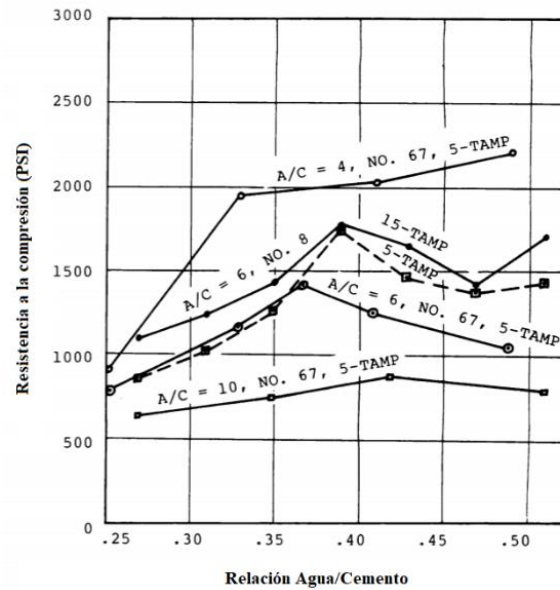


Figura 4.6 Correlación entre la resistencia a compresión y la relación A/C. Tomado de: Meininger (1988).

- 7) Para el contenido de cemento se parte con la ecuación (4.10) donde se parte de la expresión del volumen de pasta.

$$V_p = V_c + V_a \quad (4.10)$$

Donde V_c corresponde a volumen de concreto y V_a es volumen de agua y la ecuación (4.10) se puede expresar de la siguiente manera:

$$V_p = \frac{c}{D_c} + \frac{a}{D_a} \quad (4.11)$$

Donde c es la masa del concreto para un metro cubico, D_c densidad del cemento, a es la masa del agua y D_a la densidad del agua y esta a su vez se puede expresar de la siguiente manera.

$$V_p = \frac{c}{3,15 * 997 kg/m^3} + \frac{\frac{a}{c} * c}{997 kg/m^3} \quad (4.12)$$

En la ecuación (4.12) solo cuenta con una incógnita que es (c) del cemento porque el volumen de pasta ya es conocido en el paso anterior y es de un 18% que lo se expresó en la ecuación como un 0,18 finalmente se reemplaza todos los valores dando como resultado la expresión de la ecuación (4.13) posteriormente es despejada (c) y se efectúa las operaciones.

$$0,18 = \frac{c}{3,15 * 997 kg/m^3} + \frac{0,4 * c}{997 kg/m^3} \quad (4.13)$$

$$c = 251,13 \text{ kg}$$

8) Para el cálculo de la masa del agua se aplica la siguiente fórmula:

$$0,40 = \frac{a}{c} \quad (4.14)$$

$$a = 251,13 kg * 0,40$$

$$a = 100,45 kg$$

- 9) Se calcula el volumen total de los sólidos para hacer el chequeo de la porosidad obtenida para un metro cúbico, se aplica la ecuación (4.15) para calcular el volumen del cemento, agua y agregado grueso.

$$V_0 = \frac{Masa}{Gravedad\ específica\ del\ material * Volumen} \quad (4.15)$$

- Volumen de agregado grueso se aplica la ecuación (4.15) se reemplaza los valores por el resultado de la ecuación (4.9) resultando en la siguiente expresión:

$$V_{agg} = \frac{1529,10\ kg}{2,65 * 1000\ kg/m^3} = 0,58\ m^3$$

- Volumen de cemento se aplica la ecuación (4.15) se reemplaza los por el resultado de la ecuación (4.13) resultando en la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{251,13\ kg}{3,15 * 1000\ kg/m^3} = 0,08\ m^3$$

- Volumen de agua aplicando la ecuación (4.15) reemplazando los valores por el resultado de la ecuación (4.14) resultando en la siguiente expresión:

$$V_a = \frac{100,45\ kg}{0,997 * 1000\ kg/m^3} = 0,10\ m^3$$

10) Se suman todos los valores de volumen de agregado grueso, cemento y agua para calcular la porosidad obtenida para un metro cúbico con el resultado de la ecuación (4.16) se calcula el porcentaje de vacíos para un metro cúbico aplicando la ecuación (4.17).

$$V_{Sólidos} = V_{agg} + V_c + V_a \quad (4.16)$$

$$V_{Sólidos} = 0,58 \, m^3 + 0,08m^3 + 0,10 \, m^3$$

$$V_{Sólidos} = 0,757 \, m^3$$

$$Vacíos \% = \frac{(Vol_{Total} - Vol_{Sólidos})}{Vol_{Total}} * 100\% \quad (4.17)$$

$$Vacíos \% = \frac{(1 \, m^3 - 0,757 \, m^3)}{1 \, m^3} * 100\%$$

$$Vacíos = 24,3 \% \approx 24\%$$

Con esta verificación se puede comprobar que el uso de las tablas y referencias para el elaboración de concreto permeable son teóricamente correctos, coincidiendo todos los criterios del diseño de mezcla con los resultados esperados, este paso a paso más detallado de la aplicación del proceso metodológico de Meininger (1988) para la elaboración de concretos permeables, se resalta el criterio de diseño hidrológico y diseño hidráulico de concreto, haciendo las recomendaciones de factores de seguridad y criterios para la inclusión para futuras

investigaciones de partir de un diseño hidráulico e hidrológico de la zona donde se quiera aplicar esta tecnología, lo anterior señalado es con el fin de tener una estructura de concreto permeable 100% funcional, porque no es coherente tener una estructura porosa perfectamente diseñada estructuralmente y que esta no sea capaz de darle manejo a las agua pluviales y se vea comprometida su funcionalidad y servicialidad para con la comunidad a quien pretende mejorar su calidad de vida.

4.2.4.2 *Diseño de mezcla N2.*

Para el segundo diseño se aplicó la misma metodología, pero solo se referenció las ecuaciones para hacer el proceso más corto sin embargo se obtendrá un diseño 100% funcional hidrológica y estructuralmente.

1) Porosidad de diseño 20 %

2) Grava ensacado argos $\frac{3}{4}$ ''

Se ingresa en la Tabla 3.3 y se observó que para un tamaño 67 da una relación de vacíos por metro cúbico de 0,99 y cero agregados finos.

3) Peso específico = 1471 kg/m³ ajustado por la ecuación (4.8)

$$W_a = 1456,29 \text{ kg} \quad (4.18)$$

4) Ajuste del agregado grueso.

$$w_{ssd} = 1529,10 \text{ kg} \quad (4.19)$$

- 5) Seleccionar el contenido de pasta, para este paso es recomendable apoyarse en la *Figura 4.5* (ver línea roja) donde se encuentra con el valor de 20% de contenidos de vacíos calculado en la ecuación (4.7) y se selecciona ligeramente compactado, dando como resultado un 22% de contenido de pasta para el segundo diseño de mezcla.
- 6) Para seleccionar la relación agua cemento apoyarse en la *Figura 4.6* como elemento guía para el diseño de mezcla se optó por 0,35
- 7) Para el contenido de cemento se usa la ecuación (4.12) reemplazando las variables por los nuevos criterios de diseño resulta la nueva expresión ver (4.20).

$$0,22 = \frac{c}{3,15 * 997 kg/m^3} + \frac{0,35 * c}{997 kg/m^3} \quad (4.20)$$

$$c = 328,62 \text{ kg}$$

- 8) Cálculo de la masa del agua se aplica la siguiente fórmula (4.21) donde el valor de C es reemplazado por el resultado de la ecuación (4.20)

$$0,35 = \frac{a}{c} \quad (4.21)$$

$$a = 328,62 \text{ kg} * 0,35$$

$$a = 115,02 \text{ kg}$$

9) Se calcula el nuevo volumen total de los sólidos para realizar el chequeo de la porosidad obtenida para un metro cúbico, implementando la ecuación (4.15) para calcular el volumen del cemento, agua y agregado grueso.

- Volumen de agregado, grueso aplicando la ecuación (4.15) reemplazando los valores por el resultado de la ecuación (4.18) resultando en la siguiente expresión:

$$V_{agg} = \frac{1529,10 \text{ kg}}{2,65 * 1000 \text{ kg/m}^3} = 0,58 \text{ m}^3$$

- Volumen de cemento, aplicando la ecuación (4.15) reemplazando los valores por el resultado de la ecuación (4.20) resultando en la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{328,62 \text{ kg}}{3,15 * 1000 \text{ kg/m}^3} = 0,104 \text{ m}^3$$

- Volumen de agua aplicando, la ecuación (4.15) y reemplazando los valores por el resultado de la ecuación (4.21) resultando en la siguiente expresión:

$$V_a = \frac{115,02 \text{ kg}}{0,997 * 1000 \text{ kg/m}^3} = 0,115 \text{ m}^3$$

10) Ahora son sumados todos los valores de volumen de agregado grueso, cemento y agua para calcular la porosidad obtenida para un metro cúbico con el resultado de

la ecuación (4.22) se calcula el porcentaje de vacíos para un metro cúbico aplicando la ecuación (4.16)

$$V_{\text{Sólidos}} = 0,58 \text{ m}^3 + 0,104 \text{ m}^3 + 0,115 \text{ m}^3 \quad (4.22)$$

$$V_{\text{Sólidos}} = 0,799 \text{ m}^3$$

Implementando la ecuación (4.17) para calcular la porosidad de diseño da como resultado:

$$V_{\text{vacíos}} \% = \frac{(1 \text{ m}^3 - 0,799 \text{ m}^3)}{1 \text{ m}^3} * 100\%$$

$$V_{\text{vacíos}} = 20,1 \% \approx 20\%$$

Los diseños de mezcla están resumidos como se observa a continuación.

Tabla 4.5
Resumen de los diseños de mezcla

| Diseño de mezcla N1. | | Diseño de mezcla N2. | |
|---------------------------|---------|---------------------------|---------|
| P. Max (mm/h) | 223,8 | P. Max (mm/h) | 96 |
| Periodo de retorno (años) | 20 | Periodo de retorno (años) | 10 |
| Agregado grueso (kg) | 1529,10 | Agregado grueso (kg) | 1529,10 |
| Granulometría (N°) | 67 | Granulometría (N°) | 67 |
| Porosidad (%) | 24 | Porosidad (%) | 20 |

| | | | |
|---------------------------------------|--------|---------------------------------------|--------|
| Contenido de pasta (%) | 18 | Contenido de pasta (%) | 22 |
| Relación A/C | 0,4 | Relación A/C | 0,35 |
| Cemento (kg) | 251,13 | Cemento (kg) | 328,62 |
| Agua(kg) | 100,45 | Agua(kg) | 115,02 |
| Volumen de cemento (m ³) | 0,08 | Volumen de cemento (m ³) | 0,104 |
| Volumen de agregado (m ³) | 0,58 | Volumen de agregado (m ³) | 0,58 |
| Volumen de agua (m ³) | 0,10 | Volumen de agua (m ³) | 0,115 |
| Volumen de Sólidos (m ³) | 0,757 | Volumen de Sólidos (m ³) | 0,799 |

Nota: El volumen de Sólidos corresponde la suma de volúmenes de cemento, agregado y agua. Fuente elaboración propia.

4.2.5 Costo de producción.

Para el análisis y comparación de presupuesto del concreto permeable frente al concreto tradicional se realizó una cotización en la empresa nombrada Unión temporal de obras hidráulicas D.D quienes señalan que el precio por metro cúbico puesto en el lugar de trabajo de 2.400 psi ronda un valor aproximado de 406.540 pesos colombianos.

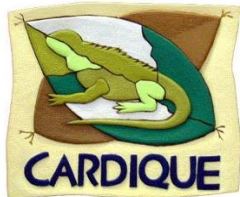

| | | | | | | |
|--|---------------------------------|--|-------------------------|-------------|---------------|--------------|
|  | |  | | | | |
| CONTRATO DE CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS Y/O DISEÑOS DE LAS OBRAS A EJECUTAR EN LA JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CANAL DEL DIQUE - CARDIQUE- Y LA UNIÓN TEMPORAL OBRAS HIDRÁULICAS D.D. | | | | | | |
| OBRAS DE MANTENIMIENTO Y/O RELIMPIA A MAQUINA EN xx xxx, MUNICIPIO DE xxx, DEPARTAMENTO DE xxxx. | | | | | | |
| ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS | | | | | | |
| CAPITULO: | | 4 | ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS | | | |
| No. ITEM: | 4.1 | DESC. ITEM: | CONCRETO DE 2400 PSI | | | |
| UNIDAD: | M3 | CANT: | 1,00 | FECHA: | 22/06/2020 | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| ID | DESCRIPCIÓN | TIPO | TARIFA/HORA | RENDIMIENTO | VALOR - UNIT | |
| E12 | Mezcladora 1 Bulto | E. MENOR | \$ 7.600,00 | 2,000 | \$ 3.800,00 | |
| | | | \$ - | | \$ - | |
| HM | HERRAMIENTA MENOR | | \$ 200,00 | 1,000 | \$ 200,00 | |
| | | | | SUB-TOTAL | \$ 4.000,00 | |
| II. MATERIALES EN OBRA | | | | | | |
| ID | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | PRECIO - UNIT. | CANTIDAD | VALOR - UNIT | |
| M42 | Arena Lavada | m3 | \$ 65.000,00 | 0,756 | \$ 49.140,00 | |
| M19 | Cemento | kg | \$ 580,00 | 315,000 | \$ 182.700,00 | |
| M20 | Triturado de 3/4" | m3 | \$ 55.000,00 | 0,756 | \$ 41.580,00 | |
| M12 | Agua | Lt | \$ 70,00 | 165,900 | \$ 11.613,00 | |
| | | | \$ - | | \$ - | |
| | | | | SUB-TOTAL | \$ 285.033,00 | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| ID | MATERIAL | VOL - PESO O CANT. | DISTANCIA | M3-KM | TARIFA | VALOR - UNIT |
| T2 | TRANSPORTE DE MATERIAL | 1,70 | 15,00 | 25,50 | \$ 2.500,00 | \$ 63.750,00 |
| | | | | 0,00 | \$ - | \$ - |
| | | | | | SUB-TOTAL | \$ 63.750,00 |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| ID | CUADRILLA | UNIDAD | JORNAL TOTAL | RENDIMIENTO | VALOR - UNIT | |
| C2 | CUAD. OC 1:2 (OFICIAL:AYUDANTE) | JOR | \$ 430.062,01 | 8,000 | \$ 53.757,75 | |
| | | | \$ - | | \$ - | |
| | | | \$ - | | \$ - | |
| | | | | SUB-TOTAL | \$ 53.757,75 | |
| | | | TOTAL COSTO DIRECTO | | \$ 406.540,75 | |

Figura 4.7 APU típica de un concreto de 2.400 psi. Fuente: Unión temporal de obras hidráulicas (2020).

Tabla 4.6
APU para el diseño de mezcla N1

| Análisis De Precios Unitarios | | | | | | | |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|---|-----------|----------------|---------------|---------------|
| Capítulo: | 4 | | Estructuras | | | | |
| No. ítem: | 4.1 | Desc. ítem: | Concreto permeable Diseño de mezcla N1. | | | | |
| Unidad: | M3 | Cant: | 1,00 | Fecha: | 22/06/2020 | | |
| | | | | | | | |
| I. Equipo | | | | | | | |
| Id | | Descripción | | Tipo | Tarifa/Hora | Rendimiento | Valor - Unit. |
| E12 | | Mezcladora 1 Bulto | | E. Menor | \$ 7.600,00 | 2,000 | \$ 3.800,00 |
| Hm | | Herramienta Menor | | | \$ 200,00 | 1,000 | \$ 200,00 |
| Sub-Total | | | | | | \$ 4.000,00 | |
| | | | | | | | |
| II. Materiales En Obra | | | | | | | |
| Id | | Descripción | | Unidad | Precio - Unit. | Cantidad | Valor - Unit. |
| M19 | | Cemento | | Kg | \$ 580,00 | 263,550 | \$ 152.859,00 |
| M20 | | Triturado De 3/4" | | M3 | \$ 55.000,00 | 0,609 | \$ 33.495,00 |
| M12 | | Agua | | Lt | \$ 70,00 | 105,000 | \$ 7.350,00 |
| Sub-Total | | | | | | \$ 193.704,00 | |
| | | | | | | | |
| III. Transportes | | | | | | | |
| Id | | Material | Vol - Peso O Cant. | Distancia | M3-Km | Tarifa | Valor - Unit. |
| T2 | | Transporte De Material | 1,70 | 15,00 | 25,50 | \$ 2.500,00 | \$ 63.750,00 |
| Sub-Total | | | | | | \$ 63.750,00 | |
| | | | | | | | |
| IV. Mano De Obra | | | | | | | |
| Id | | Cuadrilla | | Unidad | Jornal Total | Rendimiento | Valor - Unit. |
| C2 | | Cuad. Oc 1:2 (Oficial: Ayudante) | | Jor | \$ 430.062,01 | 8,000 | \$ 53.757,75 |
| Sub-Total | | | | | | \$ 53.757,75 | |
| | | | | | | | |
| Total, Costo Directo | | | | | | \$ 315.211,75 | |

Nota: Costo aproximado para el diseño de mezcla N1 por metro cúbico. Fuente elaboración propia.

Tabla 4.7
APU para el diseño de mezcla N2

| Análisis De Precios Unitarios | | | | | | | |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|---|-----------|----------------|-------------|---------------|
| Capítulo: | 4 | | Estructuras | | | | |
| No. ítem: | 4.1 | Desc. ítem: | Concreto permeable Diseño de mezcla N2. | | | | |
| Unidad: | M3 | Cant: | 1,00 | Fecha: | 22/06/2020 | | |
| | | | | | | | |
| I. Equipo | | | | | | | |
| Id | | Descripción | | Tipo | Tarifa/Hora | Rendimiento | Valor - Unit. |
| E12 | | Mezcladora 1 Bulto | | E. Menor | \$ 7.600,00 | 2,000 | \$ 3.800,00 |
| Hm | | Herramienta Menor | | | \$ 200,00 | 1,000 | \$ 200,00 |
| | | | | | | Sub-Total | \$ 4.000,00 |
| | | | | | | | |
| II. Materiales En Obra | | | | | | | |
| Id | | Descripción | | Unidad | Precio - Unit. | Cantidad | Valor - Unit. |
| M19 | | Cemento | | Kg | \$ 580,00 | 328,62 | \$ 200.129,58 |
| M20 | | Triturado De 3/4" | | M3 | \$ 55.000,00 | 0,609 | \$ 33.495,00 |
| M12 | | Agua | | Lt | \$ 70,00 | 105,000 | \$ 8.452,50 |
| | | | | | | Sub-Total | \$ 242.078,48 |
| | | | | | | | |
| III. Transportes | | | | | | | |
| Id | | Material | Vol - Peso O Cant. | Distancia | M3-Km | Tarifa | Valor - Unit. |
| T2 | | Transporte De Material | 1,70 | 15,00 | 25,50 | \$ 2.500,00 | \$ 63.750,00 |
| | | | | | | Sub-Total | \$ 63.750,00 |
| | | | | | | | |
| IV. Mano De Obra | | | | | | | |
| Id | | Cuadrilla | | Unidad | Jornal Total | Rendimiento | Valor - Unit. |
| C2 | | Cuad. Oc 1:2 (Oficial: Ayudante) | | Jor | \$ 430.062,01 | 8,000 | \$ 53.757,75 |
| | | | | | | Sub-Total | \$ 53.757,75 |
| | | | | | | | |
| Total, Costo Directo | | | | | | \$ | 363.586,23 |

Nota: Costo aproximado para el diseño de mezcla N1 por metro cúbico. Fuente elaboración propia.

El coste de elaboración para un concreto tradicional de 2.400 psi es aproximadamente de 406.540 pesos en su precio final, reporta Unión temporal de obras (2020) mientras que para el diseño N1 presentó un valor de 315.211 pesos y para el N2 de 363.586 pesos, eso significa que el concreto tradicional es un 22,5% más costoso en su precio final que el diseño propuesto N1 y un 10,6% frente al diseño N2, para el diseño N1 se usó un porcentaje de pasta de 18% y para N2 de 22%.

Se observa en la figura 4.8 que el diseño N1 presenta un ahorro en la cantidad de material cementante frente al concreto tradicional, este contra a N1 es de un 16,3% más económico en el cemento, esto debido a que la estructura es porosa por ende no maciza. Para el caso del diseño tradicional contra N2 se aumentó el contenido de pasta así mismo se incrementó el cemento y dio como resultado 9,5% más costoso. Frente al uso del agregado los diseños de concreto permeable son un 19,4% más económicos que un diseño de 2.400 psi, el consumo del agua de N1 es más económico un 36,7% y para N2 es 27,2%.

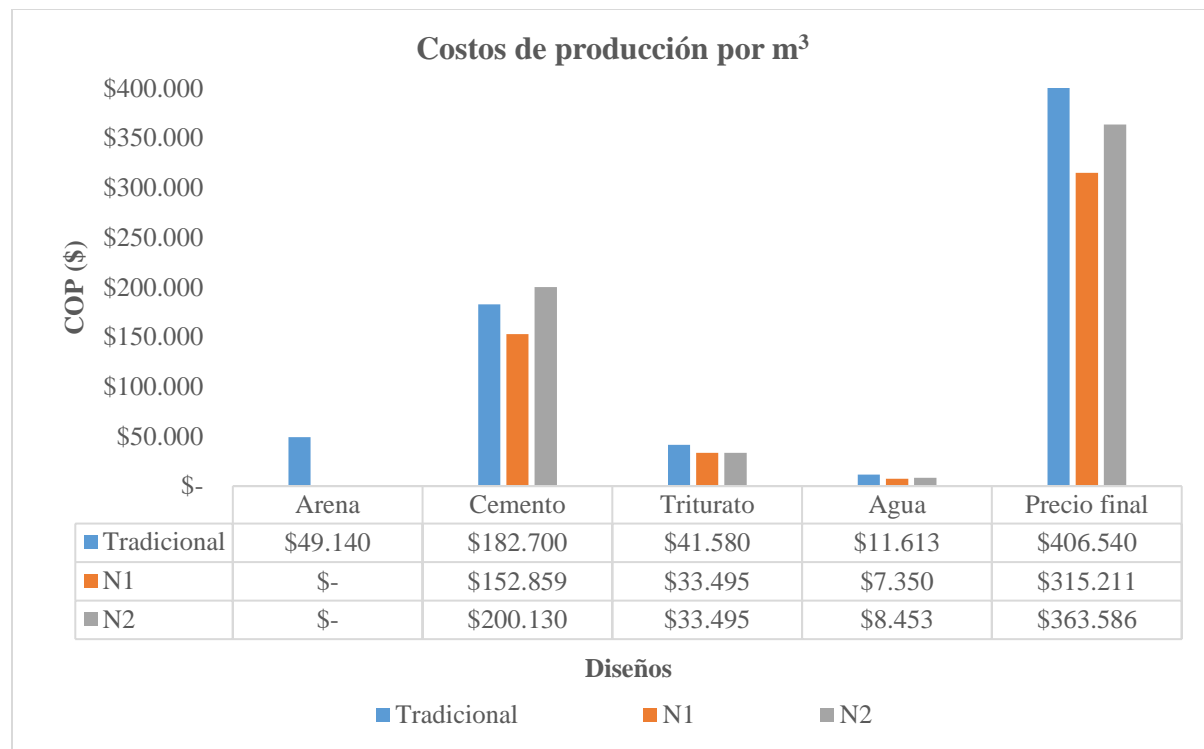


Figura 4.8 Resumen de costos. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Diseño estructural del pavimento

4.3.1 General.

Para el cálculo del espesor del concreto permeable como se resaltó en los títulos 4.2.3 diseño hidráulico y 4.2.4 para el diseño de mezcla es muy importante tener en cuenta la mayor cantidad de variables, en este título será tratado el espesor de losa o de capa de rodadura y el espesor de la sub base ya que estas dos características tienen un alto impacto en la funcionalidad y servicialidad del concreto permeable, esta sección está dirigida y enfocada a los aspectos aplicables a la estructura porosa.

4.3.2 Base granular.

Es el conjunto de capas de material de origen pétreo procedentes de canteras, constituida por partes de grava o piedra que son compactados usualmente en varias capas de acuerdo a las especificaciones del proyecto además tienen varias cualidades como lo son: la

durabilidad y ausencia de arcillas o material vegetal, también se le incorpora material mineral finamente triturado o arena para lograr una mejor consistencia, todo esto con el fin de mejorar la capacidad portante del suelo y brindar un mejor apoyo a la carpeta de rodadura.

Algunos suelos tienen la capacidad suficiente de drenaje y de capacidad portante, para estos suelos la subbase puede ser opcional. Pero si se diera el caso contrario que el suelo tenga la capacidad de estabilidad comprometida, es mejor optar por la construcción de una sub base. Aumentando la rigidez de la estructura, crece la capacidad de carga de la carpeta de rodadura, típicamente la rigidez puede ser estimada por el módulo de reacción de la subrasante denominado con la letra “k” por medio del ensayo de placa de carga, más comúnmente conocido como CBR el “*California Bearing Ratio*”. ACI 330R suministra la rigidez típicas para distintos tipos de suelos y proporciona las correlaciones entre los valores calculados por los distintos métodos (American Concrete Institute 330R, 2008).

Tabla 4.8

Tipos de suelos ACI 330-R

| Tipos de suelos | Resistencia de la subbase | CBR (%) | Valor de $k \times 10^{-6}$ (kg/cm ³) |
|---|---------------------------|-----------|---|
| Suelos finos con arena, en los cuales predomina arcilla y limo | Bajo | 3 – 6 | 1620 – 2430 |
| Arenas mal graduadas y suelos predominantemente arenosos con moderadas cantidades de limo y arcilla | Medio | 30 – 45 | 2430 – 3560 |
| Gravas, arenas bien graduadas y arenas con gravas relativamente libres de finos plásticos | Alto | Más de 45 | Más de 3560 |

Nota: Clasificación general de suelos y sus típicas capacidades. Fuente: Adaptada de: ACI 330-R (2008)

4.3.3 Clasificación del suelo en Barranquilla.

La clasificación del suelo donde se va a realizar el proyecto es un factor muy importante, ya que si el suelo presenta alguna deficiencia es el momento idóneo para mejorarlo, porque si se hace más adelante puede aumentar los costos o si se omite, comprometerá la vida útil de la estructura, a continuación, Moreno-Rodríguez (2014) presenta una clasificación del suelo, este artículo está especializado en la caracterización geotécnica de Barranquilla, producto de la investigación de un aproximado de 120 diseños geotécnicos, con un promedio de tres sondeos a profundidad variable entre el rango de los uno y diez metros, en la *Figura 4.9* se muestran como puntos marrones los sondeos de exploración del suelo de Barranquilla.



Figura 4.9 Ubicación de los sondeos de exploración geotécnica. Fuente: Tomado de Moreno-Rodríguez (2014).

Moreno-Rodríguez (2014) en su investigación reporta la elaboración de un perfil estratigráficos de toda la ciudad con el fin de que se pueda establecer para cualquier parte de Barranquilla un perfil del suelo, toda esta investigación es producto de la recolección de datos del programa de ingeniería civil de la Universidad de la Costa, para la presente investigación fue tomado el perfil estratigráfico con sondeos de 1 metro de profundidad, el perfil se puede observar en la Figura 4.10.

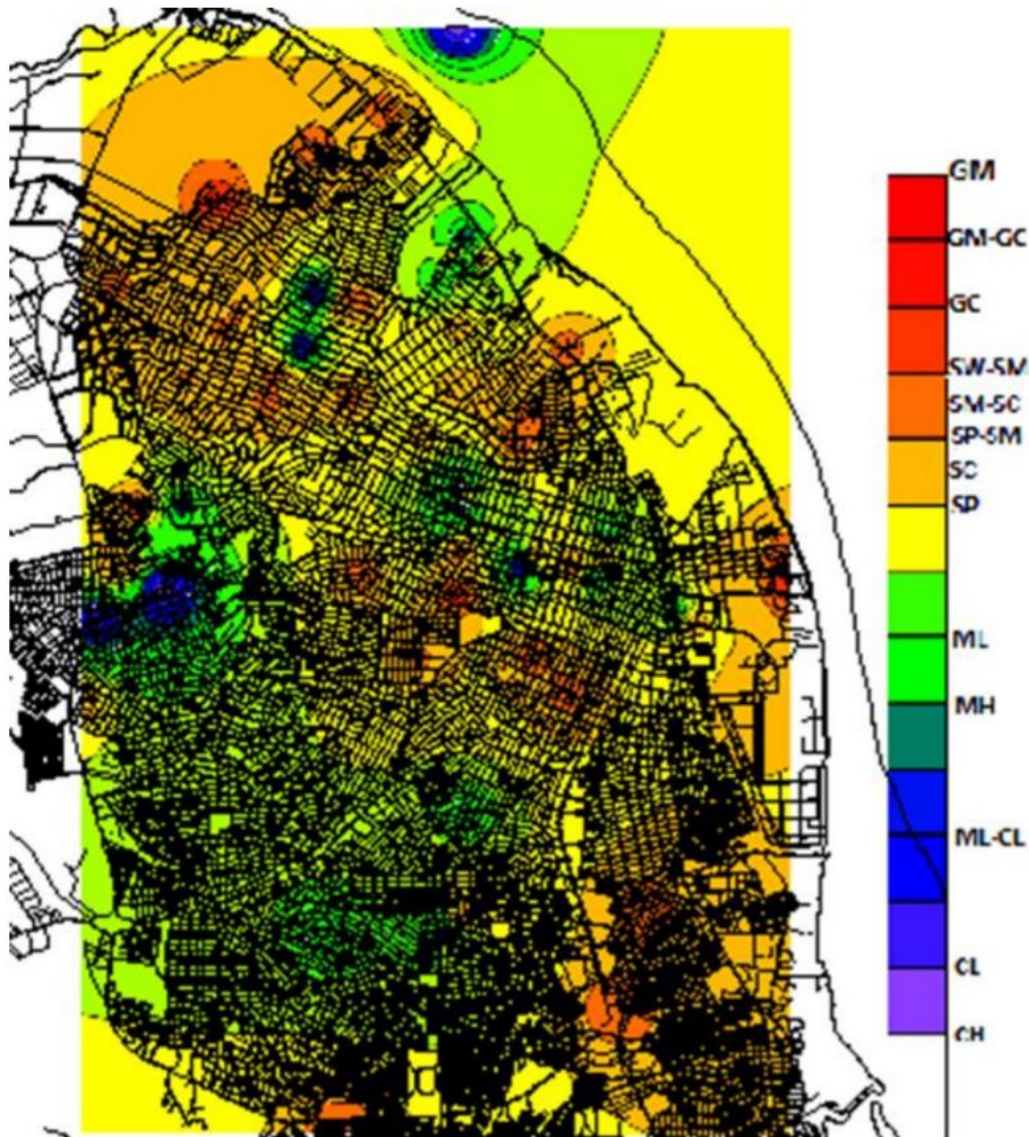


Figura 4.10 Perfil estratigráfico de Barranquilla, profundidad 1 metro. Fuente: Tomado de Moreno-Rodríguez (2014).

Como se observa en el mapa, los colores predominantes son los cálidos haciendo referencia a SP, arena pobremente graduada. SC, arena arcillosa y ML, limos. Ya con el suelo clasificado se aplica la literatura de Bester (1993).

Tabla 4.9

Rangos de valor k recomendados para varios tipos de suelo

| Clasificación AASHTO | Descripción | Clasificación SUCS | Densidad seca (kg/m³) | CBR (%) | Valor de K (MPa/m) |
|---|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------|-----------------------|
| Suelos de grano grueso | | | | | |
| A – 1 – a, Bien graduada | Grava | GW | 2000 – 2240 | 60 – 80 | 81 – 122 |
| A – 1 – a, Pobrememente graduada | | GP | 1920 – 2080 | 35 – 60 | 81 – 108 |
| A – 1 – b | Arena gruesa | SW | 1760 – 2080 | 20 – 40 | 54 – 108 |
| A – 3 | Arena fina | SP | 1680 – 1920 | 15 – 25 | 41 – 300 |
| A – 2 suelo (Material Granular con abundantes partículas finas) | | | | | |
| A – 2 – 4, Gravoso | Gravas con Limos | GM | 2080 – 2320 | 40 – 80 | 81 – 136 |
| A – 2 – 5, Gravoso | Grava Gruesa con Limos | | | | |
| A – 2 – 4, Arenoso | Arena con Limos | SM | 1920 – 2160 | 20 – 40 | 81 – 108 |
| A – 2 – 5, Arenoso | Arenas gruesas Con limos | | | | |
| A – 2 – 6, Gravoso | Grava con Arcilla | GC | 1920 – 2240 | 20 – 40 | 54 – 122 |
| A – 2 – 7, Gravoso | Arena Gruesa con Arcilla | SC | 1680 – 2080 | 10 – 20 | 41 – 350 |
| A – 2 – 6, Arenoso | Arena con Arcilla | | | | |
| A – 2 – 7, Arenoso | Grava con Arena Y Arcilla | | | | |
| Suelos finos | | | | | |
| A – 4 | Limos | ML | 1440 – 1680 | 4 – 8 | 7 – 45* |
| | Limos/Arenas y mezclas de Gravas | OL | 1600 – 2000 | 5 – 15 | 1 – 60* |
| A – 5 | Limo pobrememente Graduado | MH | 1280 – 1600 | 4 – 8 | 7 – 51* |
| A – 6 | Arcilla plástica | CL | 1600 – 2000 | 5 – 15 | 7 – 69* |
| A – 7 – 5 | Arcilla Moderadamente Plástica | CL, OL | 1440 – 2000 | 4 – 15 | 7 – 58* |
| A – 7 – 6 | Arcilla altamente Plástica | CH, OH | 1280 – 1760 | 3 – 5 | 11 – 60* |

Nota: (*) El valor k de un suelo de grano fino depende en gran medida del grado de saturación. Adaptado de: Delatte (2008, p.72).

4.3.4 Selección del espesor.

El comité del ACI 330R proporciona un amplio debate sobre el tema, proporcionado estudios de Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) en ella se comparte cálculos por tipos de camiones, desde el más pequeño al más grande, con frecuencias muy altas para camiones ligeros y frecuencias menores para para camiones más pesados, cabe resaltar aunque el flujo vehicular de camiones pesados es menor, son los que generan un impacto mayor en el desgaste de concreto por el fenómeno de fatiga, dada esta situación se debe optar por incluir una base para un concreto permeable, dado que este también tiene ausencia de acero de refuerzo y su resistencia a la flexión típicamente es menor que un concreto tradicional, para determinar se aplicó la literatura de la Tabla 4.10 y Tabla 4.11.

Tabla 4.10

Tipos de suelo de subrasante y valores de soporte aproximados

| Tipo de suelo | Soporte | k, psi/in | CBR | R |
|---|---------|-----------|-----------|---------|
| Suelos de grano fino en los que predominan las partículas de limo y arcilla. | Bajo | 75 - 120 | 2,5 – 3,5 | 10 – 22 |
| Arenas y mezclas de arena y grava con cantidades moderadas de limo y arcilla. | Medio | 130 - 170 | 4,5 – 7,5 | 29 – 41 |
| Arena y mezclas de arena y grava relativamente libres de finos plásticos | Alto | 180 - 220 | 8,5 - 12 | 45 – 52 |

Nota: 1 psi/in. = 0,27 MPa/m. Fuente: Adaptado de: ACI 330-R (2008).

Tabla 4.11

*Módulo de reacción de subrasante k **

| Valor de <i>k</i> de la subrasante, psi/in | Espesor de la sub base | | | |
|--|------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 4 in (100 mm) | 6 in (150 mm) | 9 in (225 mm) | 12 in (300 mm) |
| Sub base de agregado granular | | | | |
| 50 | 65 | 75 | 85 | 110 |
| 100 | 130 | 140 | 160 | 190 |
| 200 | 220 | 230 | 270 | 320 |
| 300 | 320 | 330 | 370 | 430 |

Nota: 1 psi/in. = 0,27 MPa/m. Fuente: Adaptado de: ACI 330-R (2008).

Fue elegido el tipo de suelo más crítico que sería un SC una arena con arcillas que daría un valor típico de CBR de 2,5 hasta 3,5 reporta el comité ACI 330-R (2008, p. 3) entrando con el valor de *k* en la Tabla 4.11 daría un espesor de 150 mm, para complementar esta decisión se confronta los datos con el libro “*Concrete Pavement Design, Construction, And Performance*” (2008) por otra parte para el diseño del espesor de la capa de rodadura o de concreto permeable se encuentra que en los criterios de diseño se manejan resistencias a flexión de 3,5 a 4,5 MPa por cual deja por fuera los diseño propuesto, diseño N1 de porosidad de 24% ronda una resistencia a la flexión de 1,8 MPa y en el diseño N2 de 20% ronda los 2,2 MPa dada la situación se aplicaron las tablas de diseño de Norbert (2008, p 189).

Tabla 4.12

Tablas de diseño de espesor de pavimento para hormigón permeable

| 20,3MPa/m 75 psi/in | | MPa | psi | MPa | psi | MPa | psi | MPa | psi |
|---------------------|---------|--------------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| CBR =2,5 | | 3,1 | 450 | 2,7 | 400 | 2,4 | 350 | 2,0 | 300 |
| Uso | Tráfico | Espesor de pavimento requerido | | | | | | | |
| | TPDA | mm | in | mm | in | mm | in | mm | in |
| Residencial | 1 | 178 | 7 | 191 | 7,5 | 203 | 8 | 229 | 9 |
| | 10 | 203 | 8 | 216 | 8,5 | 229 | 9 | 254 | 10 |
| Colector | 25 | 229 | 9 | 241 | 9,5 | 254 | 10 | 280 | 11 |
| | 300 | 254 | 10 | 267 | 10,5 | 292 | 11,5 | 318 | 12,5 |
| Arteria | 100 | 267 | 10,5 | 280 | 11 | 305 | 12 | 330 | 13 |
| Menor | 300 | 280 | 11 | 292 | 11,5 | 318 | 12,5 | 356 | 14 |
| | 700 | 292 | 11,5 | 305 | 12 | 330 | 13 | 356 | 14 |
| Arteria | 700 | 305 | 12 | 330 | 13 | 356 | 14 | 381 | 15 |
| Mayor | 1500 | 318 | 12,5 | 330 | 13 | 368 | 14,5 | 394 | 15,5 |

Nota: Recomendaciones para espesores típicos de concreto permeable. Adaptado de: Norbert (2008, p 192).

Con la Tabla 4.12 se designa para concreto permeable con una resistencia a flexión de 350 psi un espesor de capa de 23 cm que si se confronta con los valores de la normativa local más próxima que sería el Manual De Diseño De Pavimentos De Concreto Para Vías Con Bajo, Medios y Altos Volúmenes De Tránsito (2008) en la sección de espesores con SN, MR1 y con ausencia de dovelas y un tránsito bajo T0 recomienda un espesor de losa de 24 cm también, como el espesor es recomendado por los dos reglamentos se decide por seguir las recomendaciones para la investigación quedando de la siguiente forma: Concreto permeable 240 mm, sub base granular 150 mm y sub rasante 75 – 120 de k y un CBR de 2,5 – 3,5.

4.4 Estudios de revisión en la literatura.

En general toda la bibliografía revisada entre sus observaciones señalaba muchos aspectos del concreto permeable dada esta situación se posee una alta información al respecto, pero se ha optado por los 25 artículos que se señalan en la Tabla 4.13, se establecieron tres principales aspectos a resaltar y profundizar del concreto permeable como lo son los beneficios ambientales, estudios de mantenimiento y finalmente aplicaciones y usos.

Tabla 4.13

Clasificación de artículos de revisión

| Autores | Beneficios ambientales | Estudio de mantenimiento | Aplicaciones y usos |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Xie et al. (2019) | X | | |
| Batezini & Balbo (2015) | | X | |
| Holmes et al. (2017) | X | | |
| Pieralisi et al. (2017) | | | X |
| EPA (1999) | | X | |
| Xie et al. (2019) | X | | |
| Hu et al. (2020) | | | X |
| Kayhanian et al. (2012) | | X | |
| Lee et al. (2013) | X | | |
| Chen et al. (2019) | | X | |
| Liu & Borst (2018) | X | | |
| Haselbach et al. (2011) | X | | |
| Lu et al. (2019) | X | | |
| Kevern (2011) | | X | |
| Sandoval et al. (2020) | X | | |
| Zhang et al. (2018) | | | X |

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------|----------|
| Chu et al. (2017) | X | | |
| Tian et al. (2014) | X | | |
| Cooley (1999) | | X | |
| Li et al. (2013) | X | | |
| Chen et al. (2015) | X | | |
| Kayhanian et al. (2019) | | | X |
| Siriwardene et al. (2007) | X | | |
| Lee et al. (2013) | X | | |
| Stinson et al. (1997) | | X | |
| Total | 14 | 7 | 4 |

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Beneficios ambientales.

4.4.1.1 Calidad del agua.

El concreto permeable funciona como un filtro en la retención de metales pesados como lo señala Liu & Borst (2018), en la disminución de elementos como lo son el Bario, Cromo, Cobre, Manganeseo, Níquel, Zinc, Cadmio, Plomo y arsénico, otro estudio de Zhang et al. (2018) donde se realizaron pruebas durante un año para simular la operación futura de 26 años en ella se encontró la disminución de concentración de Plomo, Aluminio, Hierro, Zinc, Manganeseo y Cobre por otra parte Lee et al. (2013) señaló la reducción de otras sustancias como el ácido sulfúrico y aceite de motor que se encuentra diluidos en el agua de mar y que después de atravesar una capa de concreto permeable se le practicaron pruebas de concentración y se encontró una disminución del 3% al 1% que corresponde al aceite de motor y de ácido sulfúrico del 36% al 1% igualmente el contenido de salinidad de la solución. Todos estos resultados se dieron luego de que el agua contaminada atravesara una capa de 20 cm de espesor que este

espesor incluía una base agregado y una subbase (Holmes et al., 2017; Lee et al., 2013; Xie et al., 2019).

Investigaciones han demostrado los siguientes beneficios ambientales, la disminución del contenido de metales pesados en el agua. La extracción a largo plazo de estos contaminantes en varios pavimentos permeables se ha investigado recientemente Zhang et al. (2018), mediante la aplicación de una prueba con una duración de un año para simular 26 años de operación de servicio. El estudio confirmó que el concreto permeable posee la capacidad de eliminar elementos químicos, tales como Pb, Al, Fe, Zn, Mn y Cu. Un estudio con duración de seis años informó un resultado semejante Liu & Borst (2018), en el que la concentración de Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn, Cd, Pb y As de los tres pavimentos permeables estaba por debajo de los concretos convencionales (Xie et al., 2019).

4.4.1.2 *Atenuación del efecto de isla de calor.*

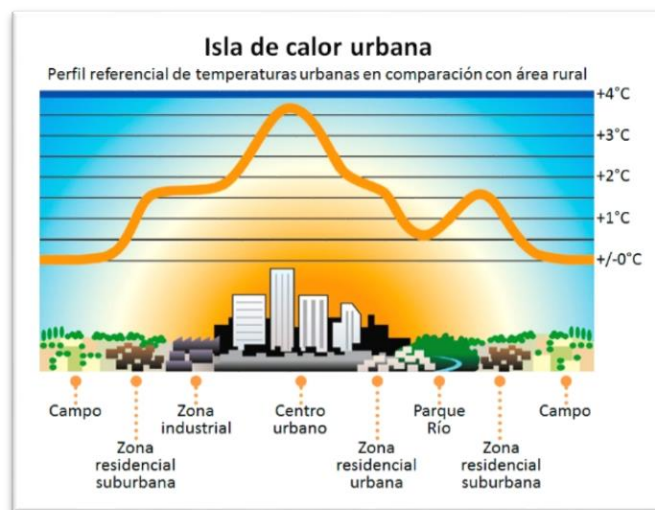


Figura 4.11 Representación del fenómeno de isla de calor. Tomada de: María Blender (2015).

El fenómeno de isla de calor es producto de la tendencia mundial a la urbanización de terrenos, donde se recubre la corteza terrestre con edificaciones y concreto lo cual altera el ciclo

natural y produce algo similar a un efecto invernadero, donde las zonas asfálticas y de concreto tradicional absorben la radiación solar y estos adquieren una temperatura que se mantiene en el transcurso del día y es atenuada ya en horas de la noche cuando no se recibe radiación solar.

Li et al. (2013) en los resultado de su investigación reportó que compararon las temperaturas superficiales de un concreto asfáltico y un concreto permeable los datos de temperatura se pueden observar en (ver *Figura 4.12*) donde muestran seis fotografías tomadas con una cámara térmica a los concretos.

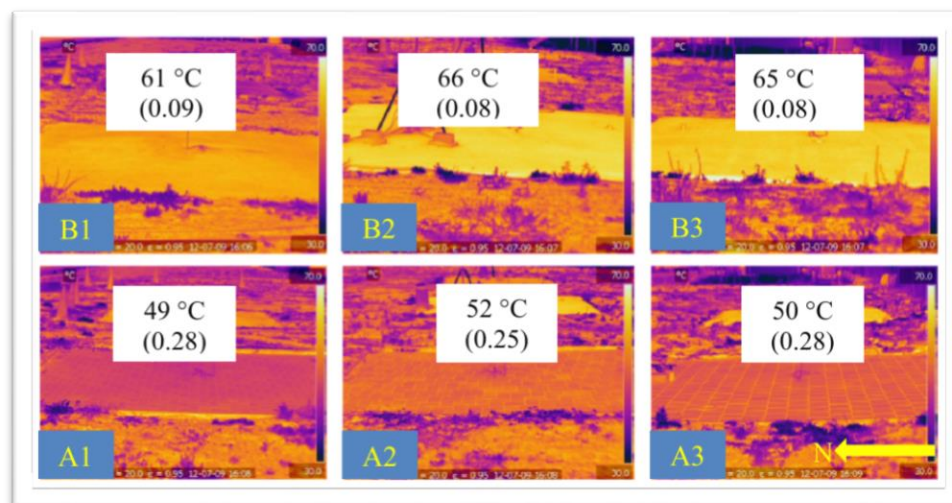


Figura 4.12 Fotografía térmica de las losas de concretos. Tomada de: Li et al. (2013)

Se observa en la *Figura 4.12* las losas de concreto permeables con nomenclatura A1, A2, A3 que tienen un delta de temperatura de 13,67°C respecto al promedio de losas de nomenclatura B1, B2, B3 que representa a unas losas de asfalto. Otro aspecto muy importante de resaltar es el índice de reflectancia solar (SRI). Haselbach et al. (2011) en su investigación señala que el concreto tradicional tiene un SRI de 37% mientras que el concreto permeable tiene un índice de 14% es de resaltar que el Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED) ha tomado como

referencia de no más 29% como el criterio o punto de inflexión para denominar o nombrar una superficie como una superficie fría o de baja absorción de energía (Leadership In Energy & Environmental Design, 2018).

4.4.1.3 Reducción de la contaminación sonora.

El concreto permeable ha demostrado tener beneficios en lo que concierne a la mitigación del ruido producto del tráfico vehicular, todo esto debido a sus poros, el proceso consiste en que el vehículo al rozar con la superficie de concreto permeable crea una onda sonora en todas las direcciones y una parte de estas ondas ingresan entre los poros y son redirigidas al terreno natural (Stinson et al., 1997). Por otra parte Chu et al. (2017) señaló en su estudio en Singapur que los niveles tradicionales de ruido estaban en el rango de los 100 – 110 dB mientras que con la aplicación de concreto permeable resultó un rango de 96 – 98 dB, las tomas de datos fueron entre los años 2009 y 2010. Estudios han demostrado que la influencia del agregado grueso afecta la resistencia a compresión, infiltración y contenido de vacíos (Liu & Borst, 2018; G. Lu et al., 2019; Pieralisi et al., 2017). El efecto de la absorción acústica se ve mejorado con la aplicación de un tamaño único de agregado, esto se debe a que se crea una capa más uniforme de concreto permeable. Estudios señalan que usar el tamaño único de 9,5 mm presenta el mejor coeficiente de absorción sonora para CP (Tian et al., 2014).

4.4.2 Estudios de mantenimientos.

Para concreto permeable existe la posibilidad alta que sus poros sean obstruidos por residuos sólidos pequeños, como puede ser la arena, hojas de árboles, madera, entre otros. Hu et al. (2020) propone tres opciones de mantenimiento preventivo para el concreto permeable con una frecuencia de seis meses entre mantenimientos, el aspirado, lavado con hidro-lavadora y succión al vacío, donde se llega a la conclusión que si no se realiza un mantenimiento periódico

el concreto perderá su porosidad. Las actividades de mantenimiento se centran básicamente en restaurar la conductividad hidráulica para no perder la capacidad de evacuación (Kevern, 2011).

En muchos estudios se resalta que diseñar concreto permeable con agregado fino a pesar de aumentar su resistencia a compresión y la flexión, con el pasar del tiempo afecta la infiltración, más exactamente con arenas finas de tamaño 0,1 mm hasta 0,84 mm, también se resaltó que una porosidad entre los 5 – 6 mm y 1 – 2 mm son muy poco susceptible a perder la porosidad por la obstrucción de elementos extraños (Chen et al., 2015).



Figura 4.13 Mantenimiento preventivo con hidro-lavadora. Tomada de: Pavipor (2018).

El efecto que producen los neumáticos de los automóviles en la obstrucción y limpieza del concreto permeable, al pasar un neumático sobre un concreto permeable se producen dos reacciones, una es que el neumático comprime o empuja las partículas pequeñas entre los poros y crea las obstrucciones de estos y otro efecto casi de inmediato cuando la llanta avanza ligeramente crea una succión de vacío y esto al mismo tiempo, produce que una parte de las

partículas salgan despedidas hacia afuera ayudando a la limpieza del concreto permeable (Cooley, 1999; Kayhanian et al., 2012; Siriwardene et al., 2007).

4.4.3 Aplicaciones y usos.

El uso de esta tecnología del concreto tiene como usos principalmente en:

- Áreas de estacionamiento de tráfico ligero.
- Caminos rurales.
- Ciclovías.
- Senderos peatonales.
- Zonas deportivas y parques.
- Patios y jardines.
- Andenes peatonales.
- Pisos en donde se quiere mejores características de absorción acústica.
- Capas de base para las calles urbanas.
- Zonas de lavado de automotores.
- Estructuras para salida de playas.
- Bordes de piscina.
- Riachuelos.
- Caminos destapados.

(Batezini & Balbo, 2015; Kayhanian et al., 2019; Sandoval et al., 2020).

4.5 Estudios experimentales en la literatura.

En la recopilación de artículos científicos se designó como filtro principal que todos los experimentos sean basados en la ACI 522-R (2010). Fueron clasificados en dos grupos uno nombrado grupo A que era cuando su resistencia a compresión era mayor o igual a 21 MPa y un

segundo grupo designado grupo B para una resistencia menor a 21 MPa todo esto con el fin de presentar la información de manera más detallada, para que, al momento de analizar sus diseños, estuvieran agrupados por las mismas variables y de este modo obtener resultados correlacionados fuertemente.

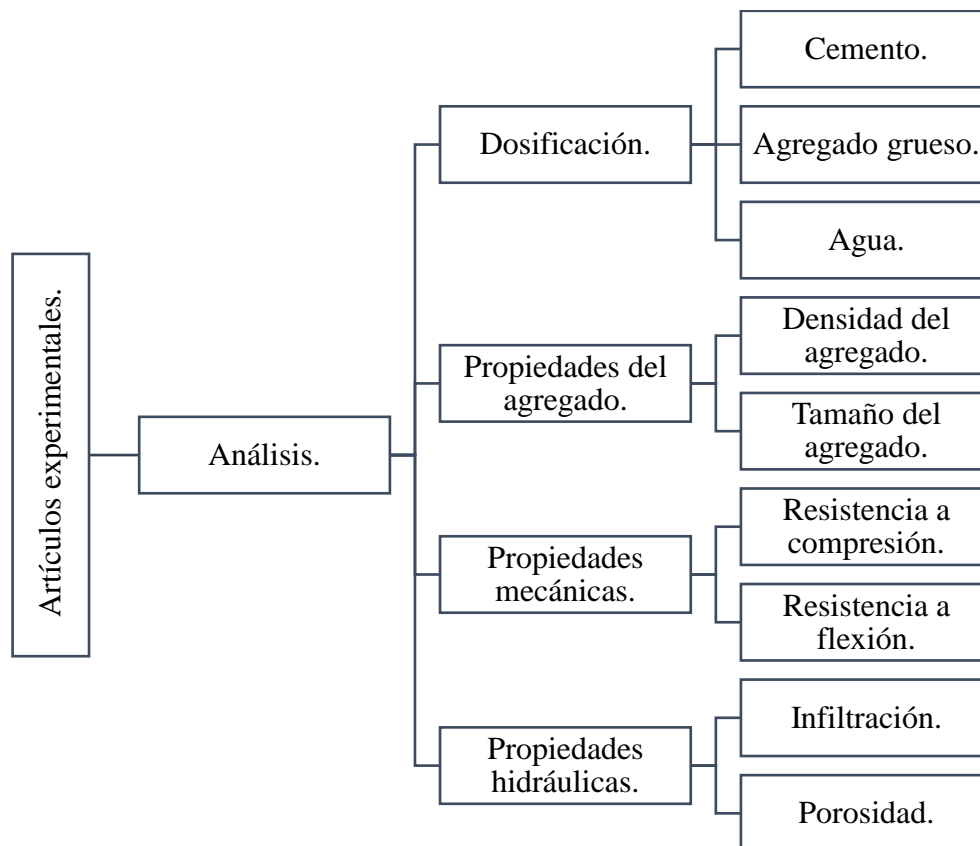


Figura 4.14 Clasificación de los estudios en la literatura para su análisis estadístico. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.14 contiene el resumen de los diseños de mezcla en los que se basó esta investigación para comprender el proceso de elaboración de CP y sus variables, como lo son, el uso de aditivo, incorporación de ceniza volante, humo de sílice, arena, densidad de los agregados, naturales - reciclados, tamaño nominal y como era su efecto en la resistencia a compresión.

Tabla 4.14

Clasificación de artículos experimentales

| Resumen de los artículos estudiados para la investigación | | | | |
|---|--------------------------|---------------|-----------|---|
| Estudios grupo A | Material cementante (kg) | Agregado (kg) | Agua (kg) | Observación |
| Chandrappa & Biligiri (2017) | 380 | 1520 | 133 | *Diseño P6: Gradación que consiste en 25% de 19–13,2 mm + 25% de 13,2–9,5 mm + 25% de 9,5–6,7 mm + 25% de 6,7–4,75 mm plastificante a base de lignosulfato 0,2% gravilla. |
| Cristian Gaedicke et al (2015) | 285 | 1453 | 85 | ***Diseño G15: 43 kg de ceniza volante y 242 kg de cemento gravilla. |
| Yu et al. (2019) | 378 | 1703 | 117 | Diseño D: Las muestras fueron fundidas en moldes 100 mm × 100 mm × 100 mm. Basalto 4,75–9,5 mm. |
| Zhou et al. (2019) | 357 | 1550 | 111 | *Diseño 2 – 1 tamaño de 4,75 – 9,5: modificador líquido 11 (kg * m ⁻³) Basalto. |
| Hassan et al. (2019) | 500 | 1325 | 200 | **Diseño P10-S0-R100: Fue fundida en cilindros de 150 × 300 mm, agregado reciclado. |
| Lu et al. (2019) | 302 | 1510 | 97 | Diseño 100F: Diseño control con triturados de tamaño 2,36 – 5 mm, el tipo de agregado fue granito. |
| Tavares & Kazmierczak (2016) | 398 | 1307 | 133 | Diseño N-400: Tamaño del agregado 1,77 – 12 basalto triturado natural. |
| Barnhouse & Srubar (2016) | 489 | 1350 | 132 | *Diseño Control: Se añadió un reductor de agua de alto rango (HRWR) (59 mL/cwt) ensayos en cilindros 100×200 mm gravilla. |
| Debnath & Sarkar (2019) | 418 | 1087 | 146 | * **Diseño M-0.35-0.10: Se utilizó 10% de finos ensayo de compresión molde 150mm ladrillo rojo G-5. |
| Yu et al. (2019) | 378 | 1703 | 117 | Diseño F: Las muestras fueron fundidas en moldes 100 × 100 × 100 mm, basalto 10 – 12,5mm G.E 2,91. |
| Zhou et al. (2019) | 326 | 1550 | 101 | *Diseño 2 – 2: Tamaño 4,75 – 9,5: Modificador líquido 11 (kg * m ⁻³) basalto. |
| Hassan et al. (2019) | 326 | 1304 | 130 | **Diseño P20-S0-R100: Se fundió en cilindros de 150 × 300 mm agregado reciclado. G.E. 2,82. |
| Tavares & Kazmierczak (2016) | 539 | 1289 | 175 | Diseño N-540: Tamaño del agregado 1,77 – 12 basalto triturado natural densidad 2840 kg/m ³ . |

| | | | | |
|---------------------------|-----|------|-----|--|
| Barnhouse & Srubar (2016) | 405 | 1316 | 109 | * **Diseño RCA: Se usó reductor de agua (HRWR) (59 mL/cwt) cilindros 100×200 mm agregado reciclado. |
| Yu et al. (2019) | 378 | 1703 | 117 | Diseño C: Las muestras fueron fundidas en moldes 100 mm × 100 mm × 100 mm. Agregado de basalto, con granulometría de 6 – 8 mm. |
| Sandoval et al. (2019) | 350 | 2570 | 143 | * ***Diseño A: Ensayo con cilindros 150×300mm cemento 350kg escoria 2570 kg resina polimérica 50 kg y superplastificante 1,05 kg agregado de escoria de acero 4 – 10 mm. |
| Chang et al (2016) | 499 | 1621 | 175 | Diseño B100 OPC: Prueba británica, bloques de hormigón de 5×10×2,5 cm gravel G.E. 2,69. |
| Castro et al. (2009) | 345 | 1004 | 152 | *Diseño 0.44 – 15%: aditivo reductor de agua 0,5% del cemento, flexotracción 150×150× 550 mm gravilla. |
| Zhou et al. (2016) | 276 | 1657 | 88 | *Diseño PPC-27.5: Emulsión acrílica y policarboxílica 10% 8,84 basalto angular. |
| Torres et al. (2009) | 475 | 1743 | 190 | *Diseño ACI recomendación: Agregado grueso y fino en proporción del 60% y 40% aditivo (SP: Sikament NS) superplastificante al 1,8% triturado. |
| Saadeh et al. (2019) | 298 | 1094 | 87 | *Diseño CNCA: Las mezclas utilizadas son Plastocrete 161, viscocrete 2100, SikaTard 440 con un rango de dosificación 57–170 g gravilla. |
| Liu et al. (2019) | 633 | 1392 | 215 | **Diseño T_2.2: Ensayo de compresión fueron en moldes de 150×150×150 mm, agregado reciclado densidad aparente de 2530 kg/m ³ , absorción 3,75%. |
| Yeih & Chang (2018) | 631 | 1815 | 220 | **Diseño Type I 90%: Uso como agregado la escoria de horno de arco eléctrico, con G.E. 3,41 tamaño 4,8 – 9,6mm y un curado con agua de cal saturada. |
| Yang et al. (2020) | 352 | 1622 | 99 | *Diseño Control: 77 kg de arena de río de un tamaño de 5 mm y 211 g de reductor de agua, basalto. |
| Meng et al. (2019) | 515 | 1738 | 134 | ***Diseño U: Cementante cenizas volante 438 kg/m ³ y cemento 77 kg. Superplastificante policarboxílico 8kg/m ³ Basalto G.E. 3,16 tamaño 5-10 mm. |
| Kant et al. (2020) | 383 | 1403 | 136 | *Diseño G5_0.35 Agregado natural 12,0 – 10 mm, arena de río, 10% del agregado grueso absorción 1,17 G.E. 2,59 arena G.E 2,9 máquina de los ángeles 18,46 |

| Estudios, grupo B | | | | |
|------------------------------------|-----|------|-----|--|
| Rangelov et al. (2017) | 300 | 1716 | 83 | *Diseño 4A: Curado al aire libre cilindros de 150×300 mm, 10% de finos respecto al agregado grueso estabilizador de hidratación y 1260 g modificación de la reología 1224 g. |
| Rangelov et al. (2017) | 300 | 1716 | 83 | *Diseño 2A2M: Se varió el curado de 2 semanas al aire y 2 semanas húmedo, estabilizador de hidratación y 1260g modificación de la reología 1224 g. |
| Ribeiro et al. (2018) | 321 | 1284 | 112 | Diseño PC-1: Moldes cilíndricos de 100 x 200 mm densidad relativa 2,58 g.cm ⁻³ , absorción 3,05%, tamaño de 2,4 – 9,5 mm basalto. |
| Huang et al (2010) | 353 | 1587 | 123 | *Diseño Mix_W_Sand_B: Se usó El polímero de látex 32,5 kg/m ³ , arena de río reemplazo el 7% de agregado, basalto G.E 2,76, absorción 3,05%, tamaño 4,75 mm. |
| Cristián Gaedicke et al. (2016) | 284 | 1453 | 85 | Diseño G-0 MP: Agregados, gravilla de guisantes y piedra caliza triturada 50/50 G.E. 2,59 y 2,5. Tamaño 19 mm, absorción 0,95% y 2,47% respectivamente. |
| Debnath & Sarkar (2019) | 438 | 1086 | 140 | * **Diseño M-0.32-0.10: Se utilizó 10% de finos ensayo de compresión molde 150mm ladrillo rojo G-4. |
| Cristian Gaedicke et al (2015) | 334 | 1519 | 101 | Diseño L-0 HP: Bajo contenido de pasta, cilindros fueron re-capados con azufre antes de ser ensayados. piedra caliza, absorción 2,47% tamaño 9,5 mm. |
| Yu et al. (2019) | 302 | 1510 | 136 | Diseño 0G: Diseño con triturados de tamaño 2,36 – 5 mm granito. G.E 2,54, absorción 2,63%. |
| Elango & Revathi (2017) | 454 | 1500 | 159 | Diseño PC ₈ : Las pruebas de compresión fueron con cubos de 100×100×100 mm. Tamaño 8 mm granito azul. |
| Costa et al. (2018) | 371 | 1484 | 96 | *Diseño Cast Morta: Aditivo modificador de la reología, cilindros de 100 × 200 mm basalto tamaño 12,5 mm G.E 2,8, absorción 1.3%. |
| Sandoval et al. (2019) | 420 | 1369 | 143 | ***Diseño EFS: Basalto, escoria de horno eléctrico G.E 2,7, absorción 0,49%. |
| Wang et al. (2020) | 421 | 1600 | 122 | *Diseño 1_0%: Se incorporó reductor de agua 3,37 kg/m ³ superplastificante de policarboxilato, basalto tamaño 4,75 – 9,5 mm, gravedad aparente 2760 kg/m ³ . |

| | | | | |
|---|-----|------|-----|---|
| Ibrahim et al. (2020) | 434 | 1300 | 152 | **Diseño B: Agregado reciclado de concreto, G.E. 2,32, tamaño 4,75 – 10 mm absorción 8,05% cilindros de 100 × 200 para compresión. |
| Ibrahim et al. (2020) | 330 | 1430 | 132 | * **Diseño F: Agregado reciclado de concreto, G.E. 2,32. Tamaño 4,75 – 10 mm absorción 8,05% cilindros de 100 × 200 para compresión, 130 kg arena de río. |
| Tabatabaeian et al. (2019) | 350 | 1570 | 105 | Diseño OPC-S: Cilindros de tamaño 100×200 mm para compresión, tamaño 4,75–9,5 cemento Portland tipo II. |
| AlShareedah, Nassiri, & Dolan (2019) | 309 | 1640 | 105 | Diseño PC-CB: Tamaño máximo nominal de 9,5 mm, cilindros de 100×300 mm gravilla. |
| AlShareedah, Nassiri, Chen, et al. (2019) | 285 | 1640 | 99 | *Diseño Control: Retardador y estabilizador de hidratación mL/100 kg por cemento, agregado de basalto con tamaño 9,51 mm tamaño único, G.E 2.68. |
| Chindaprasirt et al (2008) | 273 | 1550 | 85 | Diseño N25F2: Piedra caliza de tamaño 5,0 – 13,0 mm ensayado en cilindros de 100×200 mm. |
| Fernández & Navas (2012) | 30 | 130 | 9 | *Diseño M16: Se aplicaron tres aditivos, retardante, plastificante y regulador de viscosidad, agregado de río, se usaron moldes de 150×300 y 100×200 mm. |
| Kant et al. (2020) | 364 | 1457 | 128 | Diseño G2_0.35: Agregado natural con granulometría de 1,18 – 12,5. Presentó absorción de 1,17%. G.E. 2,59. Máquina de los ángeles 18,46. |
| Ulloa-Mayorga et al. (2018) | 407 | 1269 | 216 | * **Diseño RA1- RA2_50%: 1220g de aditivo superplastificante, 50% de agregado reciclado ladrillo cerámico (G.E. 2,05 y absorción 8,7), 50 % hormigón triturado (G.E 2,1 y absorción 7,4). |
| Chen et al (2019) | 368 | 1602 | 100 | *Diseño PC-Regular: Aditivos reductores de agua de rango medio, cilindros de 100×200 mm. Gravilla |
| Elango & Revathi (2017) | 475 | 1570 | 166 | Diseño PC _{6.3} : Las pruebas de compresión fueron con cubos de 100×100×100 mm. Tamaño 6,3 mm Granito azul. |
| Zhang et al. (2017) | 420 | 1520 | 118 | * ** ***Diseño RAPC 1-6: Cemento 350 kg, ceniza volante 70 kg, reductor de agua 4,2 kg, agregado reciclado de ladrillo de arcilla tamaño de 5,0 –10,0 mm |

Nota: *Se aplicó aditivo o arena. **Agregado reciclado. ***Reemplazo de material cementante, en ausencia de “*” se considera que fue un diseño tradicional constituido por: cemento, agregado y agua. Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 4.15* presenta un diagrama en forma de resumen de la clasificación de las diferentes investigaciones analizadas.

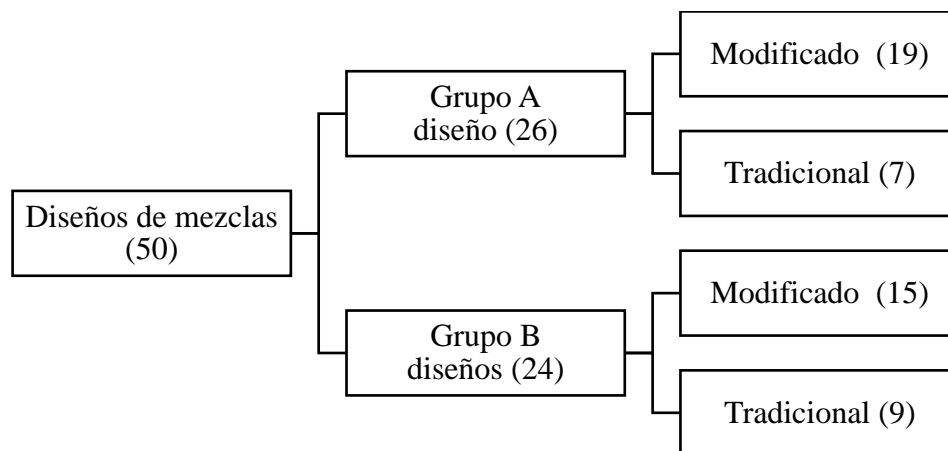


Figura 4.15 Resumen de artículos experimentales. Fuente: Elaboración propia.

En ambos grupos cuando se observa: diseño modificado, hace referencia a la implementación de un reemplazo del cemento, bien sea una fracción del cemento por humo de sílice, escoria o ceniza volante, también la aplicación de sustitución parcial del agregado grueso por agregado fino o agregado de concreto reciclado, igualmente incluye el uso de aditivos, como lo son: reductor de agua, modificador, superplastificante, entre otros, como se muestra en la Tabla 4.14 en su quinta columna llamada “observación”, finalmente los diseños nombrados como tradicionales son aquellos que están constituidos exclusivamente por cemento, agregado grueso de origen natural y agua potable.

5 Propiedades del concreto permeable

5.1 Dosificación

Para el análisis ser más adecuado se ha optado por subdividir el grupo A, en grupo A con aditivo y grupo A si aditivo, dado el gran efecto que produce en el diseño de mezcla la aplicación de estos, seguidamente se presenta la Tabla 5.1 donde se encuentran la dosificación que usaron.

Tabla 5.1
Dosificación grupo A sin aditivo

| Resistencia a compresión \bar{x} 23,2 MPa | Cemento (kg) | Agregado (kg) | Agua (kg) |
|---|--------------|---------------|-----------|
| 24,2 | 378 | 1703 | 117 |
| 27,0 | 302 | 1510 | 97 |
| 21,8 | 398 | 1307 | 133 |
| 23,6 | 378 | 1703 | 117 |
| 21,1 | 539 | 1289 | 175 |
| 23,5 | 378 | 1703 | 117 |
| 21,6 | 499 | 1621 | 175 |
| Coeficiente de correlación | -0,87 | 0,39 | -0,86 |
| R ² | 0,76 | 0,15 | 0,74 |
| Promedio | 410,3 | 1548 | 132,9 |
| Desviación estándar | 81,08 | 184,40 | 30,60 |

Nota: Diseños tradicionales. Fuente: Elaboración propia.

Para comprender más estos datos se hace a referencia Martínez (2009) donde se explica el significado de los valores de los coeficientes de correlación de Pearson *Figura 5.1*. Se observa el coeficiente del cemento y el agua están en el rango de moderado y el agregado grueso se ubica en fuerte con relación a la resistencia a compresión respectivamente, un aspecto a señalar

es la presencia de coeficientes negativos y positivos, esto gráficamente se representa como se muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.1 Coeficiente de correlación. Tomado de: Martínez et al. (2009)

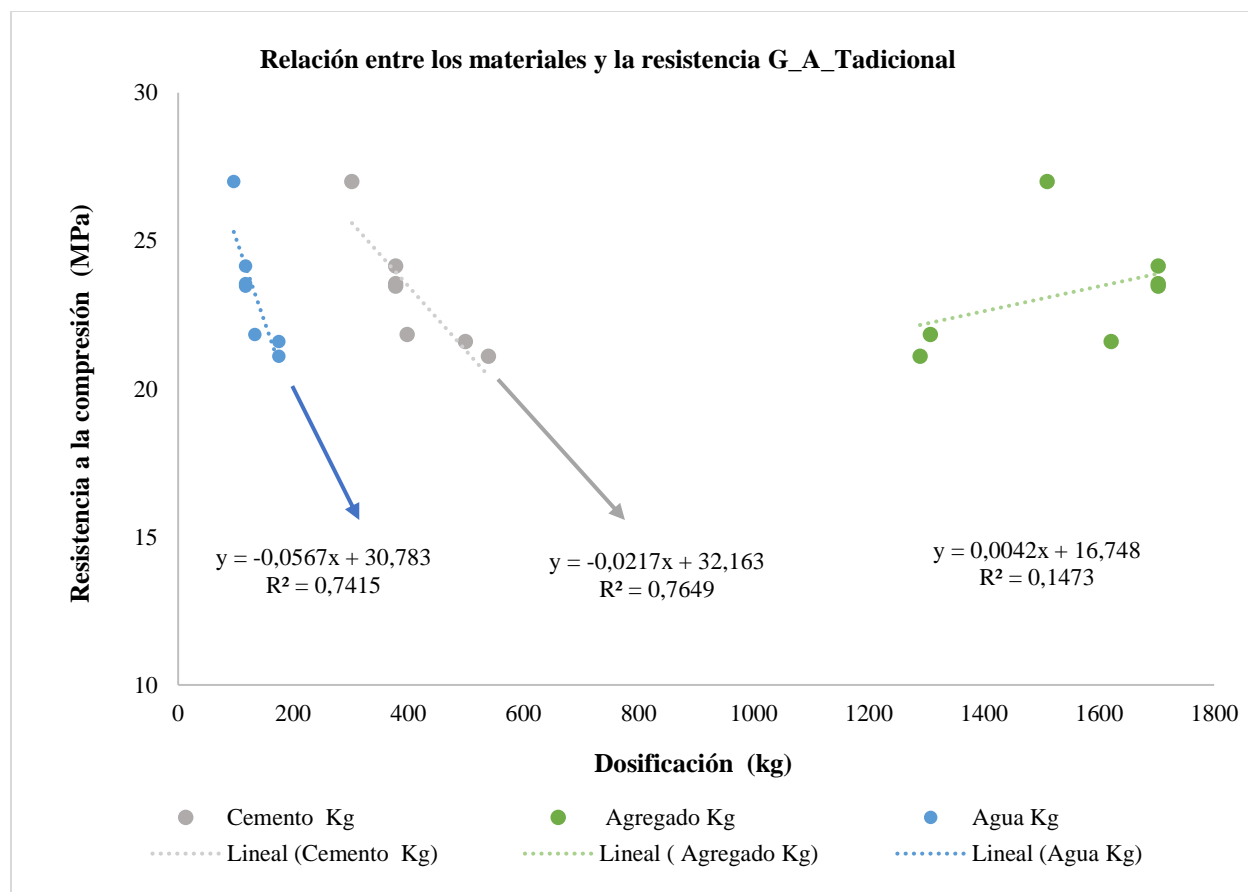


Figura 5.2 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Alto tradicional. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 5.2 los coeficientes de correlación negativa hace referencia a una relación inversamente proporcional, en este caso al aumentar el cemento y la cantidad de agua del diseño de mezcla lo que se consigue es una disminución de la resistencia a compresión, la correlación observada es fuerte, en el caso de la cantidad de agregado grueso es una correlación positiva débil, las variables resistencia y agregado aumenta proporcionalmente, haciendo referencia que usar más agregado grueso disminuye la porosidad del concreto y por esta razón se vuelve más macizo y adquiere mayor resistencia a compresión, a continuación se presenta un análisis con estadística descriptiva apoyado en la herramienta Excel.

Tabla 5.2

Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_A Tradicional

| Estadísticas de la regresión | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0,88 | Fuerte | | | | | | |
| Coefficiente de determinación R^2 | 0,77 | | | | | | | |
| R^2 ajustado | 0,54 | | | | | | | |
| Error típico | 1,38 | | | | | | | |
| Observaciones | 7 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | | | |
| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados F | Valor crítico de F | F | | | |
| Regresión | 3 | 18,91 | 6,30 | 0,18 | 3,32 | | | |
| Residuos | 4 | 5,69 | 1,90 | | | | | |
| Total | 7 | 24,60 | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
| Intercepción | 30,8193 | 7,0011 | 4,4021 | 0,0217 | 8,5387 | 53,0999 | 8,5387 | 53,0999 |
| Cemento (kg) | -0,0196 | 0,0370 | -0,5314 | 0,6320 | -0,1373 | 0,0980 | -0,1373 | 0,0980 |
| Agregado (kg) | 0,0007 | 0,0034 | 0,2055 | 0,8503 | -0,0100 | 0,0114 | -0,0100 | 0,0114 |
| Agua (kg) | -0,0043 | 0,0989 | -0,0432 | 0,9682 | -0,3192 | 0,3106 | -0,3192 | 0,3106 |

Nota: Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior permite establecer la siguiente ecuación:

$$F(x)_{Resistencia} = -0,0196x_1 + 0,0007x_2 - 0,0043x_3 + 30,8193 \quad (5.1)$$

Se presenta el grupo A y sus diseños modificados con la inclusión de distintos aditivos en algunos de estos diseños se utilizó la adicción de 100% agregado reciclado y arena.

Tabla 5.3
Dosificación grupo A Modificado

| Resistencia a compresión \bar{x} 27,7 MPa | Cemento (kg) | Agregado (kg) | Agua (kg) |
|--|--------------|------------------|-----------|
| 21 | 380 | 1520,1 | 133 |
| 23 | 285 | 1453 | 85 |
| 27,6 | 356,5 | 1550 | 110,5 |
| 24,7 | 500 | 1325 | 200 |
| 33 | 489 | 1350 | 132 |
| 24 | 383 | 1558,1 | 136 |
| 29 | 418,5 | 1086,7 | 146,5 |
| 24,1 | 325,5 | 1550 | 100,9 |
| 31,7 | 326 | 1304 | 130 |
| 34 | 405 | 1316 | 109 |
| 31,5* | 350* | 2570* | 142,8* |
| 26 | 345 | 1003,5 | 151,8 |
| 26,6 | 276 | 1657 | 88,4 |
| 32 | 475 | 1743 | 190 |
| 47 | 298,5 | 1094,1 | 87,1 |
| 24 | 633 | 1392 | 215,2 |
| 21,7 | 631 | 1815 | 220 |
| 23,1 | 352 | 1622 | 99 |
| 22,3 | 515 | 1738 | 134 |
| Coeficiente de correlación | -0,26 | -0,50 | -0,28 |
| R ² | 0,07 | 0,25 | 0,08 |
| Promedio | 410,78 | 1448,75 | 137,13 |
| Desviación estándar | 108,61 | 234,81 | 43,38 |

Nota: (*) Datos excluidos por ser muy atípicos, diseños modificados.

Fuente: Elaboración propia.

Implementando la *Figura 5.1*, se observa que el coeficiente del cemento y el agua están en el rango débil de correlación Pearson, el agregado grueso se ubica en moderada, esta correlación es la esperada dada que en algunos diseños se incluyó material fino, de igual modo al ser una sola variable más se esperó que se mantuviera en una aceptación superior al 0.50 por parte del agua y los materiales cementantes, al ser más que solo cemento, se esperó que la incorporación de ceniza volante, humo de sílice, escoria, disminuyera la correlación y se notó con referencia al diseño tradicional pasando de significativa a débil, por parte del agua se pasó de significativa a débil esto debido a los aditivos líquidos incorporados, gráficamente estos coeficientes de correlación se representan como se muestra en la *Figura 5.3*.

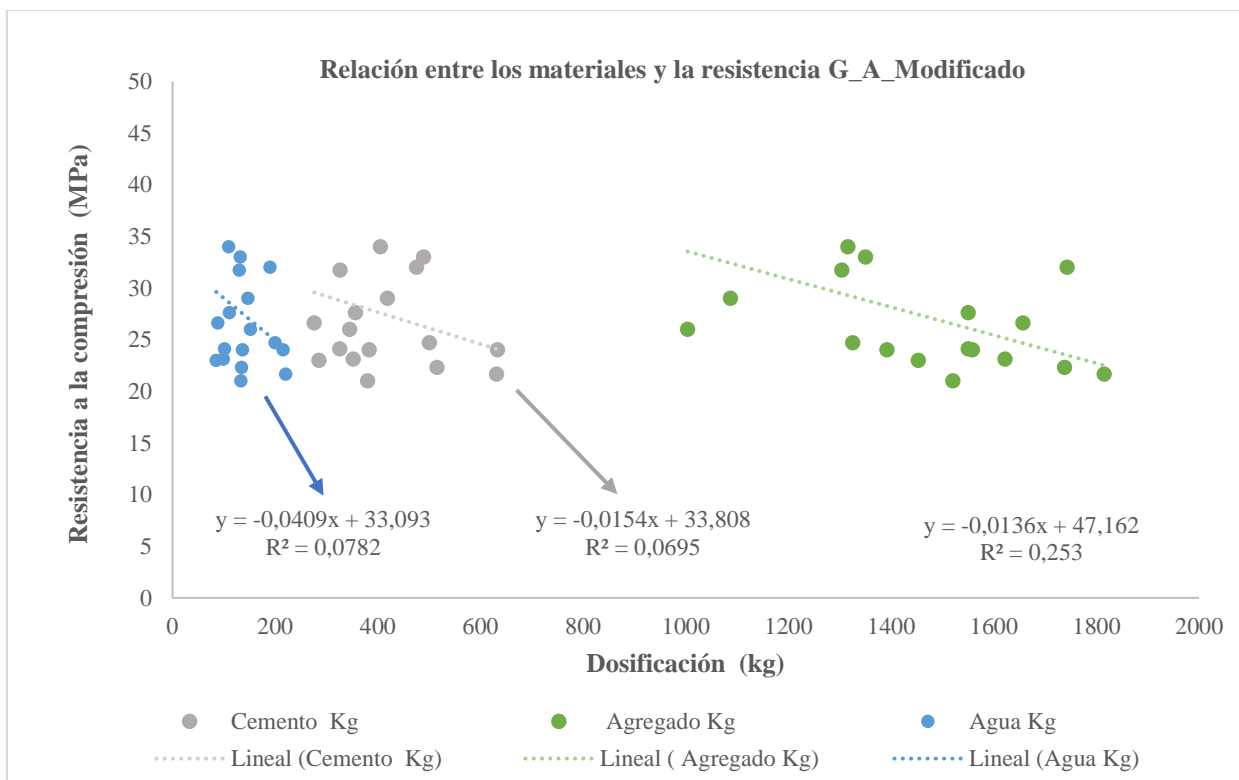


Figura 5.3 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Alto modificado. Fuente: Elaboración propia.

Para el grupo A modificado se puede afirmar que no existe correlación entre las variables debido a la incorporación de distintos aditivos. Para el agregado grueso tampoco se acepta la existencia de correlación debido a que resultó en $-0,50$ ubicándolo en moderado, para poder afirmar que existe una correlación se tendrá como límite inferior $\pm 0,70$ es decir, se afirmará que existe correlación cuando se ubique en: significativa, fuerte o perfecta (Martínez et al., 2009).

Tabla 5.4

Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_A_Modificado

| Estadísticas de la regresión | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0,56 | Moderada | | | | | | |
| Coefficiente de determinación R^2 | 0,31 | | | | | | | |
| R^2 ajustado | 0,17 | | | | | | | |
| Error típico | 5,78 | | | | | | | |
| Observaciones | 18 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | | | |
| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados F | Valor crítico de F | F | | | |
| Regresión | 3 | 214,58 | 71,53 | 0,14 | 2,14 | | | |
| Residuos | 14 | 467,82 | 33,42 | | | | | |
| Total | 17 | 682,40 | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
| Intercepción | 50,2974 | 9,3802 | 5,3621 | 0,0001 | 30,1789 | 70,4158 | 30,1789 | 70,4158 |
| Cemento (kg) | 0,0152 | 0,0275 | 0,5519 | 0,5897 | -0,0438 | 0,0741 | -0,0438 | 0,0741 |
| Agregado (kg) | -0,0140 | 0,0064 | -2,1903 | 0,0459 | -0,0277 | -0,0003 | -0,0277 | -0,0003 |
| Agua (kg) | -0,0640 | 0,0667 | -0,9595 | 0,3536 | -0,2070 | 0,0790 | -0,2070 | 0,0790 |

Nota: Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior permite establecer la siguiente ecuación:

$$F(x)_{Resistencia} = 0,0152x_1 - 0,0140x_2 - 0,0640x_3 + 50,2974 \quad (5.2)$$

Se presentan los datos del grupo B para los diseños de mezcla tradicionales ver (Tabla 5.5)

Tabla 5.5
Dosificación grupo B sin aditivo

| Resistencia a compresión \bar{x} 16,4 MPa | Cemento (kg) | Agregado (kg) | Agua (kg) |
|---|--------------|---------------|-----------|
| 18 | 284 | 1453 | 85 |
| 17,6 | 475 | 1570 | 166,2 |
| 19,5 | 364,2 | 1457,4 | 127,6 |
| 19 | 334 | 1519 | 101 |
| 10,2 | 350 | 1570 | 105 |
| 15,6 | 454 | 1500 | 158,9 |
| 16,2 | 309 | 1640 | 105 |
| 15 | 273 | 1550 | 85 |
| Coeficiente de correlación | 0,05 | -0,46 | 0,13 |
| R ² | 0,003 | 0,212 | 0,018 |
| Promedio | 355,4 | 1532,4 | 116,7 |
| Desviación estándar | 74,3 | 63,1 | 31,4 |

Nota: (*) Datos excluidos por ser muy atípicos diseños tradicionales.

Fuente: Elaboración propia.

Implementando la *Figura 5.1*, se observó que la correlación de Pearson del cemento se ubica en nula, agregado grueso se ubica en débil y el agua están en el rango muy débil con relación a la resistencia a compresión, un aspecto a señalar es la presencia de coeficientes negativos y positivos, esto gráficamente se representa como se muestra en la *Figura 5.4*

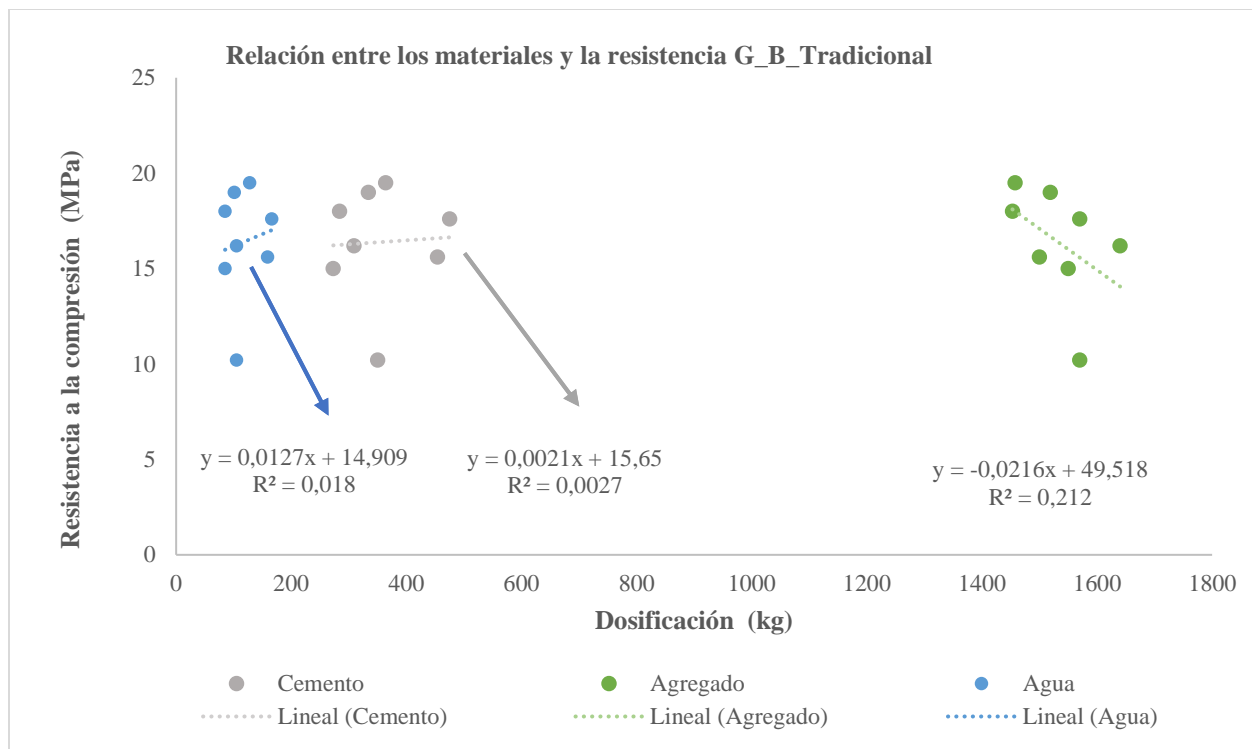


Figura 5.4 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo Bajo tradicional. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 5.4 al manejar bajo contenido de cemento y agua, se presenta una cohesión muy débil entre la pasta de cemento y el agregado grueso, logrando así de este modo que la estructura final tenga poca rigidez y soporte menos esfuerzos externos.

Liu et al. (2019) y Chindapasirt et al. (2008) por otra parte señalan que aumentar el contenido de agua aumenta la resistencia, donde se señala que una mezcla con una pasta de cemento fluida mejora la resistencia del concreto permeable dado que la pasta envuelve al agregado grueso en un mayor porcentaje logrando así una estructura más resistente. A continuación, se presenta un análisis con estadística descriptiva implementando la herramienta Excel.

Tabla 5.6

Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_B_Tradicional

| Estadísticas de la regresión | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Coeficiente de correlación múltiple | 0,65 | Moderada | | | | | | |
| Coeficiente de determinación R^2 | 0,42 | | | | | | | |
| R^2 ajustado | -0,01 | | | | | | | |
| Error típico | 2,97 | | | | | | | |
| Observaciones | 8 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | | | |
| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados F | Valor crítico de F | F | | | |
| Regresión | 3 | 26,10 | 8,70 | 0,48 | 0,98 | | | |
| Residuos | 4 | 35,35 | 8,84 | | | | | |
| Total | 7 | 61,45 | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
| Intercepción | 57,6650 | 28,7918 | 2,0028 | 0,1157 | -22,2739 | 137,6039 | -22,2739 | 137,6039 |
| Cemento (kg) | -0,0908 | 0,0783 | -1,1596 | 0,3107 | -0,3082 | 0,1266 | -0,3082 | 0,1266 |
| Agregado (kg) | -0,0230 | 0,0178 | -1,2868 | 0,2676 | -0,0725 | 0,0266 | -0,0725 | 0,0266 |
| Agua (kg) | 0,2242 | 0,1855 | 1,2086 | 0,2934 | -0,2909 | 0,7394 | -0,2909 | 0,7394 |

Nota: Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior permite establecer la siguiente ecuación:

$$F(x)_{Resistencia} = -0,0908x_1 - 0,0230x_2 + 0,2242x_3 + 57,6650 \quad (5.3)$$

Se presenta el grupo B y sus diseños modificados se resalta que en algunos diseños de mezcla se incluyó aditivos químicos, también se implementó la adición de materiales cementantes distintos al cemento como lo es el humo de sílice, escoria de horno, entre otros; el agregado grueso en algunos casos contiene arena o es agregado reciclado de concreto o arcilla roja, se presume un a baja correlación para este grupo dados los factores nombrados.

Tabla 5.7
Dosificación grupo B Modificado

| Resistencia a compresión \bar{x} 14,7 MPa | Cemento (kg) | Agregado (kg) | Agua (kg) |
|---|--------------|------------------|-----------|
| 19,2 | 300 | 1716 | 83 |
| 20,6 | 300 | 1716 | 83 |
| 12,2 | 321,1 | 1284,5 | 205 |
| 11 | 352,6 | 1586,9 | 123,4 |
| 12 | 433,9 | 1300 | 151,9 |
| 12 | 329,9 | 1300 | 131,9 |
| 19 | 438,3 | 1086,2 | 140,4 |
| 12 | 370,9 | 1483,8 | 96,4 |
| 10,1 | 420 | 1369,2 | 142,8 |
| 19,2 | 421 | 1600 | 122 |
| 15,7 | 285 | 1640,0 | 98,5 |
| 8,9 | 406,9 | 1268 | 216,1 |
| 14 | 368 | 1602 | 100 |
| 19,6 | 420 | 1520 | 118 |
| 15,8* | 30* | 130* | 9,1* |
| Coeficiente de correlación | -0,13 | 0,43 | -0,59 |
| R ² | 0,0162 | 0,1815 | 0,3428 |
| Promedio | 369,12 | 1462,37 | 129,46 |
| Desviación estándar | 54,79 | 194,16 | 40,65 |

Nota: (*) Datos excluidos por ser muy atípicos, diseños modificados.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.1, muestra los valores del coeficiente de correlación de Pearson para el cemento y la resistencia a compresión está en el rango de muy débil, mientras que el agregado y el agua se ubica en débil y moderada respectivamente. Esto se debe al reemplazo parcial del material cementante haciendo disminuir correlación Pearson, gráficamente estos coeficientes se representan como se muestra en la continuación en la Figura 5.5.

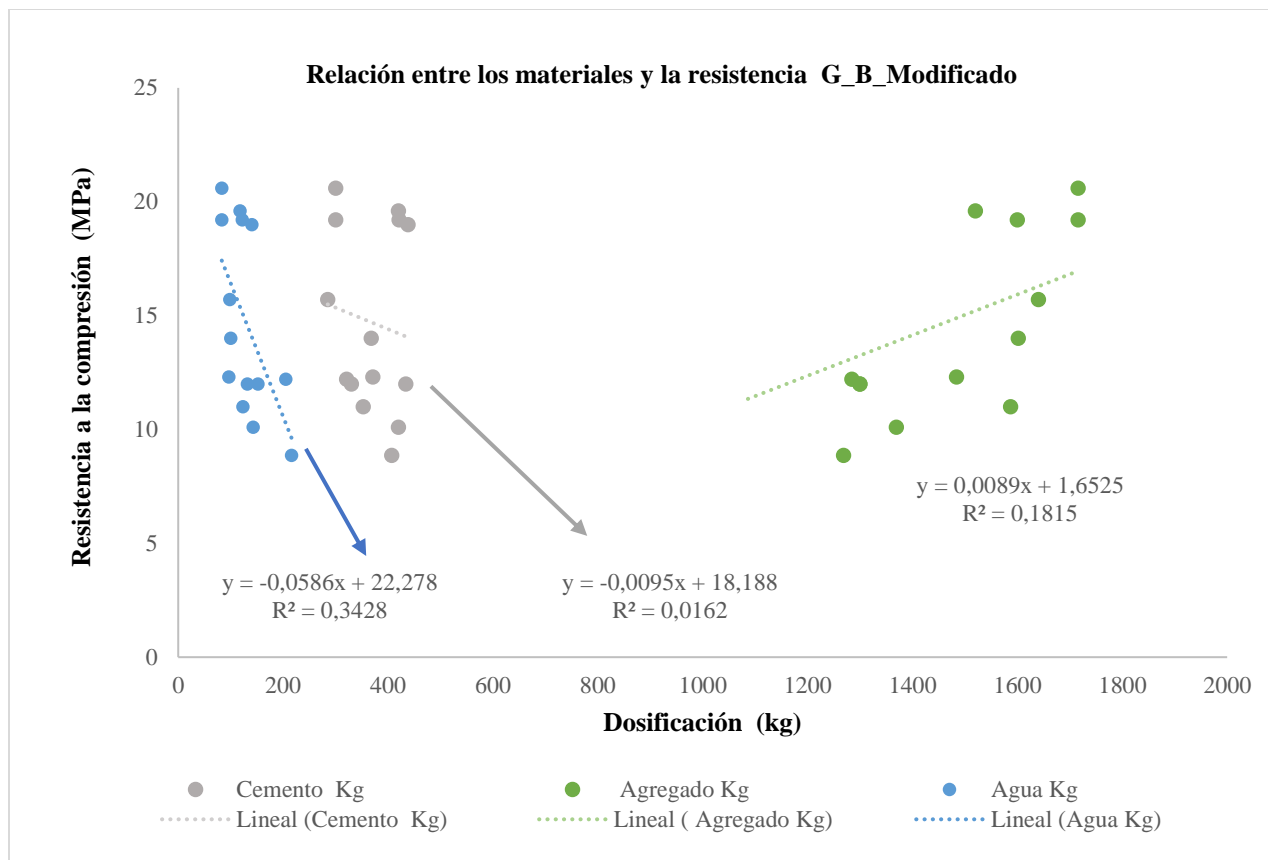


Figura 5.5 Relación de materiales y su resistencia a compresión Grupo bajo modificado. Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar de la *Figura 5.3* y la *Tabla 5.4* gracias a la incorporación de aditivos los datos se encuentran muy dispersos y presenta correlación muy débil en el agregado grueso y el cemento, esto como resultado de la incorporación de distintos aditivos que tienen diferentes propósitos, por otra parte, para el agua presenta un coeficiente de Pearson de moderada y una relación inversamente proporcional es decir a menor contenido de agua mayor resistencia, gracia a los aditivos químicos líquidos implementados para disminuir el contenido de agua.

Tabla 5.8

Resumen - Regresión lineal múltiple diseños G_B_Modificado

| Estadísticas de la regresión | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Coeficiente de correlación múltiple | 0,59 | Moderado | | | | | | |
| Coeficiente de determinación R^2 | 0,35 | | | | | | | |
| R^2 ajustado | 0,16 | | | | | | | |
| Error típico | 3,73 | | | | | | | |
| Observaciones | 14 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Análisis de varianza | | | | | | | | |
| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados F | Valor crítico de F | F | | | |
| Regresión | 3 | 75,35 | 25,12 | 0,21 | 1,81 | | | |
| Residuos | 10 | 139,03 | 13,90 | | | | | |
| Total | 13 | 214,38 | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95,0% | Superior 95,0% |
| Intercepción | 17,2964 | 21,2600 | 0,8136 | 0,4348 | -30,0739 | 64,6667 | -30,0739 | 64,6667 |
| Cemento (kg) | 0,0087 | 0,0226 | 0,3866 | 0,7071 | -0,0417 | 0,0592 | -0,0417 | 0,0592 |
| Agregado (kg) | 0,0012 | 0,0088 | 0,1350 | 0,8953 | -0,0185 | 0,0209 | -0,0185 | 0,0209 |
| Agua (kg) | -0,0585 | 0,0379 | -1,5412 | 0,1543 | -0,1430 | 0,0261 | -0,1430 | 0,0261 |

Nota: Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior permite establecer la siguiente ecuación:

$$F(x)_{Resistencia} = 0,0087x_1 + 0,0012x_2 - 0,0585x_3 + 17,2964 \quad (5.4)$$

5.2 Parámetros del concreto permeable

En la Tabla 5.9 se presentan los diseños de mezcla encontrados en la literatura, donde para algunos estudios se ha transformado la resistencia a la compresión en cubos a cilindros, considerando que la resistencia en cilindros representa el 80% de la resistencia en cubos. De esta forma todos los valores corresponden a resistencia a compresión en cilindros.

Tabla 5.9

Información detallada de todos los diseños de mezclas estudiados para la investigación

| Estudios | Resistencia a compresión | Resistencia a flexión | Cemento | Agregado | Agua | Granulometría del agregado grueso (mm) | | ρ del agregado | Porosidad | Infiltración | Aditivos |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------|---------------|--------------|--|-----------------|---------------------|-------------|--------------|-----------------------|
| | (MPa) | (MPa) | (kg) | (kg) | (kg) | Límite superior | Límite inferior | kg/m ³ | (%) | cm/s | |
| Grupo A | 26,5 | 3,0 | 408,3 | 1518,6 | 136,2 | 11,4 | 8,2 | 2658 | 18,0 | 1,1 | - |
| G_A: Diseños modificados | 27,7 | 3,1 | 407,6 | 1507,8 | 137,4 | 12,0 | 9,6 | 2597 | 17,9 | 1,2 | - |
| Chandrappa & Biligiri (2017) | 21,0 | 2,9 | 380,0 | 1520,1 | 133,0 | 9,5 | 9,5 | 2865 | 20,2 | | Pl. 0,2 % |
| Cristian Gaedicke et al. (2015) | 23,0 | | 285,0 | 1453,0 | 85,0 | 9,5 | 9,5 | 2610 | 20,0 | 0,5 | R.A. 0,2% |
| Zhou et al. (2019) | 27,6 | | 356,5 | 1550,0 | 110,5 | 9,4 | 4,8 | 2763 | 21,7 | 0,9 | M.L. 11,1 kg |
| Hassan et al. (2019) | 24,7 | 1,0 | 500,0 | 1325,0 | 200,0 | 20,0 | 20,0 | 2630 | 14,0 | 0,4 | C.R. |
| Barnhouse & Srubar (2016) | 33,0 | | 489,0 | 1350,0 | 132,0 | 4,8 | 4,8 | 2600 | 37,5 | 6,3 | RAAR 59ml |
| Debnath & Sarkar (2019)* | 29,0 | | 418,5 | 1086,7 | 146,5 | 12,5 | 4,8 | 1900 | 10,0 | 0,7 | Arena 10% |
| Zhou et al. (2019) | 24,1 | | 325,5 | 1550,0 | 100,9 | 9,5 | 4,8 | 2763 | 24,0 | 1,0 | M.L. 10,1 kg |
| Hassan et al. (2019) | 31,7 | 0,9 | 326,0 | 1304,0 | 130,0 | 20,0 | 20,0 | 2630 | 22,0 | 2,1 | C.R. |
| Barnhouse & Srubar (2016) | 34,0 | | 405,0 | 1316,0 | 109,0 | 4,8 | 4,8 | | | | RAAR 59 ml |
| Sandoval et al. (2019) | 31,5 | 4,1 | 350,0 | 2570,0 | 142,8 | 10,0 | 4,0 | 2860 | 14,0 | 1,0 | SP 1,05 kg & RP 50 kg |
| Castro et al. (2009) | 26,0 | 3,4 | 345,0 | 1003,5 | 151,8 | 10,0 | 10,0 | 1520 | 15,0 | 0,8 | R.A 0,5% |
| Zhou et al. (2016) | 26,6 | 2,0 | 276,0 | 1657,0 | 88,4 | 27,5 | 27,5 | 2690 | 28,9 | | EA 10% |
| Torres et al. (2009)* | 32,0 | | 475,0 | 1743,0 | 190,0 | 19,0 | 19,0 | 2720 | 10,1 | 0,1 | Arena 40% |
| Saadeh et al. (2019) | 47,0 | 4,0 | 298,5 | 1094,1 | 87,1 | 9,5 | 9,5 | 2690 | | 1,0 | CH 170 g |
| Kant et al. (2020) | 24,0 | 3,7 | 383,0 | 1558,1 | 136,0 | 12,5 | 10,0 | 2590 | | | Arena 10% |
| Liu et al. (2019) ⁺ | 24 | 3,2 | 633,0 | 1392,0 | 215,2 | 10,0 | 5,0 | 2530 | 2,5 | 0,2 | C.R. |
| Yeih & Chang (2018) | 21,7 | 4,2 | 631,0 | 1815,0 | 220,0 | 9,6 | 4,8 | | 10,0 | 0,6 | FS |
| Yang et al. (2020) | 23,1 | 4,7 | 352,0 | 1622,0 | 99,0 | 10,0 | 5,0 | 2630 | 20,2 | 0,5 | R.A. 211 g |
| Meng et al. (2019) | 22,3 | 3,7 | 515,0 | 1738,0 | 134,0 | 10,0 | 5,0 | 3160 | 16,4 | 1,8 | SP 8 kg |
| G_A: Diseño tradicional | 23,2 | 2,1 | 410,3 | 1548,0 | 132,9 | 9,8 | 4,5 | 2806 | 18,3 | 0,4 | - |
| Yu et al. (2019) ⁺ | 24,2 | | 378,0 | 1703,0 | 117,0 | 9,5 | 4,8 | 2915 | 20,5 | | |
| Lu et al. (2019) | 27,0 | | 302,0 | 1510,0 | 96,6 | 10,0 | 5,0 | 2530 | 27,0 | 0,2 | |
| Tavares & Kazmierczak (2016) | 21,8 | 2,2 | 398,0 | 1307,0 | 133,0 | 12,0 | 1,8 | 2840 | | 0,5 | |
| Yu et al. (2019) ⁺ | 23,5 | | 378,0 | 1703,0 | 117,0 | 12,5 | 10,0 | 2915 | 20,8 | | |
| Tavares & Kazmierczak (2016) | 21,1 | 2,0 | 539,0 | 1289,0 | 175,0 | 12,0 | 1,8 | 2840 | | | |
| Yu et al. (2019) ⁺ | 23,4 | | 378,0 | 1703,0 | 117,0 | 8,0 | 6,0 | 2915 | 20,9 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|------------|--------------|---------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------------------------|
| Chang et al. (2016) ⁺ | 21,6 | | 499,0 | 1621,0 | 175,0 | 4,8 | 2,4 | 2690 | 2,3 | 0,5 | |
| Grupo B | 15,5 | 2,4 | 347,6 | 1432,2 | 120,5 | 10,8 | 7,3 | 2575 | 20,6 | 1,0 | |
| G_B: Diseños modificados | 14,8 | 2,2 | 346,5 | 1373,5 | 121,4 | 10,8 | 7,1 | 2560 | 21,0 | 1,2 | |
| Rangelov et al. (2017) | 20,6 | | 300,0 | 1716,0 | 83,0 | 9,5 | 9,5 | 2730 | 16,4 | | CH 1,26 kg |
| Ribeiro et al. (2018)* | 12,2 | 2,2 | 321,1 | 1284,5 | 205,0 | 9,5 | 2,4 | | 23,0 | 0,2 | Arena 63% |
| Rangelov et al. (2017) | 19,2 | | 300,0 | 1716,0 | 83,0 | 9,5 | 9,5 | 2730 | 15,8 | | CH 1,26 kg |
| Huang et al. (2010) | 11,0 | 1,9 | 352,6 | 1586,9 | 123,4 | 4,8 | 4,8 | 2800 | 22,0 | 1,3 | RP 0,9 kg |
| Debnath & Sarkar (2019)* | 19,0 | | 438,3 | 1086,2 | 140,4 | 19,0 | 2,4 | 1900 | 15,8 | 1,2 | Arena 10% |
| Costa et al. (2018) | 12,3 | | 370,9 | 1483,8 | 96,4 | 12,5 | 4,8 | 2800 | 26,4 | 2,0 | M.L. 3,6 L |
| Sandoval et al. (2019) | 10,1 | 2,9 | 420,0 | 1369,2 | 142,8 | 9,5 | 9,5 | 2700 | 24,8 | 1,1 | FS |
| Wang et al. (2020) | 19,2 | | 421,0 | 1600,0 | 122,0 | 9,5 | 4,8 | 2760 | 15,3 | 0,5 | RA 3,37 kg |
| AlShareedah, Nassiri, Chen, et al. (2019) | 15,7 | 2,3 | 285,0 | 1640,0 | 98,5 | 9,5 | 9,5 | 2680 | 19,0 | 1,2 | Rt 285 ml |
| Fernández & Navas (2012) | 15,8 | | 30,0 | 130,0 | 9,1 | 16,0 | 16,0 | | | 1,5 | SP 49 kg RT 79 cm ³ |
| Ulloa-Mayorga et al. (2018) | 8,9 | 2,3 | 406,9 | 1268,6 | 216,1 | 12,5 | 9,5 | 2420 | 40,7 | 2,1 | SP 0,3% |
| Chen et al. (2019) | 14,0 | 2,5 | 368,0 | 1602,0 | 100,0 | 10,0 | 10,0 | | | 0,3 | RAAR |
| Zhang et al. (2017) | 19,6 | 3,0 | 420,0 | 1520,0 | 118,0 | 10,0 | 5,0 | | 15,9 | 0,3 | RA 4,2 kg |
| Ibrahim et al. (2020) | 12,0 | 1,6 | 329,9 | 1300,0 | 131,9 | 10,0 | 4,8 | 2320 | | | C.R. Arena 10% |
| Ibrahim et al. (2020) | 12,0 | 1,3 | 433,9 | 1300,0 | 151,9 | 10,0 | 4,8 | 2320 | 17,2 | 2,5 | C.R. |
| G_B: Diseño tradicional | 16,7 | 2,7 | 349,5 | 1529,9 | 118,8 | 10,8 | 7,6 | 2602 | 19,9 | 0,8 | - |
| Cristián Gaedicke et al. (2016) | 18,0 | | 284,0 | 1453,0 | 85,0 | 19,0 | 19,0 | 2570 | 13,0 | | |
| Cristian Gaedicke et al. (2015) | 19,0 | | 334,0 | 1519,0 | 101,0 | 9,5 | 9,5 | 2570 | 20,0 | 0,2 | |
| Lu et al. (2019) | 19,5 | | 302,0 | 1510,0 | 135,9 | 10,0 | 5,0 | 2360 | 29,2 | 0,2 | |
| Elango & Revathi (2017) ⁺ | 17,6 | 2,1 | 454,0 | 1500,0 | 158,9 | 8,0 | 8,0 | 2760 | 15,6 | 1,3 | |
| Tabatabaeian et al. (2019) | 10,2 | | 350,0 | 1570,0 | 105,0 | 9,5 | 4,8 | | 28,8 | 1,6 | |
| AlShareedah, Nassiri, & Dolan (2019) | 16,2 | 2,7 | 309,0 | 1640,0 | 105,0 | 9,5 | 9,5 | | 20,0 | | |
| Chindaprasirt et al. (2008) | 15,0 | | 273,0 | 1550,0 | 85,0 | 13,0 | 5,0 | | 25,0 | | |
| Elango & Revathi (2017) ⁺ | 15,6 | 2,4 | 475,0 | 1570,0 | 166,2 | 6,3 | 6,3 | 2760 | 14,8 | 1,0 | |
| Kant et al. (2020) | 19,5 | 3,5 | 364,2 | 1457,4 | 127,6 | 12,5 | 1,2 | 2590 | 13,0 | 0,4 | |
| Promedio general | 21,2 | 2,7 | 379,2 | 1477,1 | 128,7 | 11,1 | 7,8 | 2624 | 19,3 | 1,1 | |

Nota: * Estudios donde se ha usado la arena además de agregado grueso. ρ , densidad del agregado grueso. RP, resina polimérica. SP, superplastificante. ML, modificador líquido. PI, plastificante. RA, reductor de agua. CR, concreto reciclado. EA, emulsión acrílica. CH, control de hidratación. FS escoria de horno. Rt, retardante. RAAR, reductor de agua de alto rango; + para estos estudios se transformó la resistencia a compresión en cubos a cilindros; los valores de la tabla corresponden a la resistencia a compresión en cilindros. Fuente: Elaboración propia.

6 Análisis de resultados

6.1 Resistencia a la compresión

Tabla 6.1

Resumen de diseños mezcla contra resistencia a compresión

| | Granulometría del agregado grueso | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----|---------|-------|-------|------|----------|-------|-----------------|-----|-----------------|-----|---------------------|-------|-----------|-----|
| | Resistencia compresión | DS | Cemento | DS | Agua | DS | Agregado | DS | Límite inferior | DS | Límite superior | DS | ρ del agregado | DS | Absorción | DS |
| | MPa | MPa | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | mm | mm | mm | mm | kg/m³ | kg/m³ | % | % |
| Grupo A | 26,5 | 5,7 | 408,3 | 98,7 | 136,2 | 38,9 | 1518,6 | 306,0 | 8,2 | 6,5 | 11,4 | 5,1 | 2658,2 | 332,6 | 3,0 | 2,5 |
| G_A: Diseño modificado | 27,7 | 6,2 | 407,6 | 106,5 | 137,4 | 42,2 | 1507,8 | 343,9 | 9,6 | 6,9 | 12,0 | 5,7 | 2597,1 | 370,7 | 3,4 | 2,7 |
| G_A: Diseño tradicional | 23,2 | 2,0 | 410,3 | 81,1 | 132,9 | 30,6 | 1548,0 | 184,4 | 4,5 | 2,9 | 9,8 | 2,7 | 2806,4 | 145,8 | 1,9 | 1,0 |
| Grupo B | 15,5 | 3,7 | 347,6 | 90,3 | 120,5 | 42,9 | 1432,2 | 317,1 | 7,3 | 4,1 | 10,8 | 3,3 | 2574,7 | 241,7 | 3,1 | 3,0 |
| G_B: Diseño modificado | 14,8 | 3,9 | 346,5 | 102,2 | 121,4 | 50,0 | 1373,5 | 391,6 | 7,1 | 3,7 | 10,8 | 3,3 | 2560,0 | 285,9 | 3,6 | 3,6 |
| G_B: Diseño tradicional | 16,7 | 3,0 | 349,5 | 71,7 | 118,8 | 30,0 | 1529,9 | 59,5 | 7,6 | 5,0 | 10,8 | 3,7 | 2601,7 | 148,8 | 2,4 | 2,0 |
| Promedio, general | 21,2 | 7,3 | 379,2 | 98,7 | 128,7 | 41,2 | 1477,1 | 311,2 | 7,8 | 5,4 | 11,1 | 4,3 | 2623,6 | 297,8 | 3,1 | 2,7 |

Nota: El símbolo ρ corresponde a la densidad del agregado grueso. DS, desviación estándar de los datos. Fuente elaboración propia.

Los datos que se encuentran en la fila denominada grupo A y grupo B corresponden al promedio de las propiedades y diseños de mezcla de estos, igualmente las filas de G_A y G_B modificado corresponden al promedio de datos de los diseños que incluyeron aditivos como lo fueron súper plastificante, retardante, reductor de agua, al igual que reemplazo parcial del material cementante en este caso cemento, añadiendo ceniza volante, escoria, humo de sílice o la aplicación de arena; por parte de las filas G_A y G_B tradicional, representa que usaron cemento, agregado grueso natural y agua.

Por parte del grupo A se puede observar que el promedio de la resistencia a compresión es mayor en el grupo G_A_Modificado que en el G_A_Tradicional esto se puede justificar debido a la aplicación de aditivos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto permeable, aumentando la cohesión entre las partículas de agregado y dando como resultado una estructura con mayor resistencia, capaz de soportar mayores esfuerzos que el grupo G_A_Tradicional que no incorporó sustancias para la modificación del diseño de mezcla, en la dosificación se observa que las cantidades de cemento, agua y agregado son muy próximas lo cual nos indica que la aplicación de aditivos sí mejoró la resistencia pasando de 23,2 a 27,7 MPa en promedio, por parte del porcentaje de absorción del agregado se observó que para el diseño modificado fue el doble que el tradicional y el tamaño de los agregado se mantuvo en rango entre los 4,75 y 12 mm para ambos diseños.

Se presenta el grupo bajo, se observa que el subgrupo que no uso aditivos alcanzó mayor resistencia contra el grupo que si implemento los aditivos, para poder comprender esto se debe revisar los demás datos de las propiedades y se observa que todas están muy próximas unas de otra, los valores de los cuales se puede establecer una explicación para esta situación, corresponde al agregado e infiltración, por parte del agregado existe una diferencia de masa de

156,4 kg señalando que el diseño tradicional presenta menos poros pero al revisar los datos se encuentra que para el G_B tradicional y G_B_Modificado las porosidades están en 19,9% y 21% respectivamente, pero la infiltración del grupo tradicional es en promedio de 0,6 cm/s y para el modificado de 12,0 cm/s lo cual puede señalarse como la consecuencia de las diferencia en la resistencia a compresión.

En el tamaño de agregado ambos grupos son próximos a: 7,1 - 11,4 mm como límites inferior y superior para los dos grupos, esto sugiere que el aumento de agregado se debe probablemente a la energía de compactación del agregado, es decir debido a los golpes se reacomodo de tal manera que ocupó los vacíos del molde de mejor manera que en el diseño modificado, la densidad de ambos fue de 2581 kg/m³ en promedio, lo que señala que todo va dirigido a la energía de compactación, debido que si hubiese una diferencia entre las densidades se podría señalar que dicho parámetro tuvo influencia en la resistencia del concreto permeable.

Por último, el total general representa el promedio de los datos de cada columna de las 50 filas de todos los diseños de mezclas (ver Tabla 5.9) aplicando la información a los diseños propuestos en la Tabla 4.5 se observa que el diseño menos conservador, es decir N2 se adapta más al promedio de G_B_Tradicional ver Tabla 6.2.

Tabla 6.2

Comparación del diseño propuesto contra el promedio G_B_Tradicional

| \bar{x} G_B_Tradicional | | Diseño de mezcla N2. | | Diferencia % |
|---|--------|-----------------------------|---------|---------------------|
| Agregado grueso (kg) | 1529,9 | Agregado grueso (kg) | 1529,10 | 0,05 |
| Relación A/C | 0,34 | Relación A/C | 0,35 | -2,97 |
| Cemento (kg) | 349,5 | Cemento (kg) | 328,62 | 5,97 |
| Agua (kg) | 118,8 | Agua (kg) | 115,02 | 3,18 |

Nota: Fuente elaboración propia.

Se observa que el diseño N2 se adapta al promedio de los diseños investigados en el G_B-Tradicional lo que señalaría que con este diseño se podría rondar según los datos una resistencia que comprendería el valor teórico de $\pm 16,7$ MPa.

6.2 Resistencia a flexión

Tabla 6.3

Resumen de diseños contra resistencia a flexión

| | Resistencia flexión MPa | DS MPa | Cemento (kg) | Agua (kg) | Agregado (kg) | Granulometría del agregado grueso | | ρ del agregado kg/m ³ | absorción % |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------|--------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|---|----------------|
| | | | | | | Límite inferior mm | Límite superior mm | | |
| Grupo A | 3,0 | 1,20 | 408,3 | 136,2 | 1518,6 | 8,2 | 11,4 | 2658,2 | 3,0 |
| G_A: Diseño modificado | 3,1 | 1,24 | 407,6 | 137,4 | 1507,8 | 9,6 | 12,0 | 2597,1 | 3,4 |
| G_A: Diseño tradicional | 2,1 | 0,08 | 410,3 | 132,9 | 1548,0 | 4,5 | 9,8 | 2806,4 | 1,9 |
| Grupo B | 2,4 | 0,59 | 347,6 | 120,5 | 1432,2 | 7,3 | 10,8 | 2574,7 | 3,1 |
| G_B: Diseño modificado | 2,2 | 0,57 | 346,5 | 121,4 | 1373,5 | 7,1 | 10,8 | 2560,0 | 3,6 |
| G_B: Diseño tradicional | 2,7 | 0,56 | 349,5 | 118,8 | 1529,9 | 7,6 | 10,8 | 2601,7 | 2,4 |
| Promedio, general | 2,7 | 0,99 | 379,2 | 128,7 | 1477,1 | 7,8 | 11,1 | 2623,6 | 3,1 |

Nota: El símbolo ρ corresponde a la densidad del agregado grueso. DS, desviación estándar de los datos. Fuente elaboración propia.

De la anterior tabla se puede establecer el gráfico de la figura 6.1 donde está correlacionando la resistencia a compresión y flexión para de este modo poder estimar la resistencia teórica del diseño N2 y confrontarlo con la normatividad del ACI 522-R (2010).

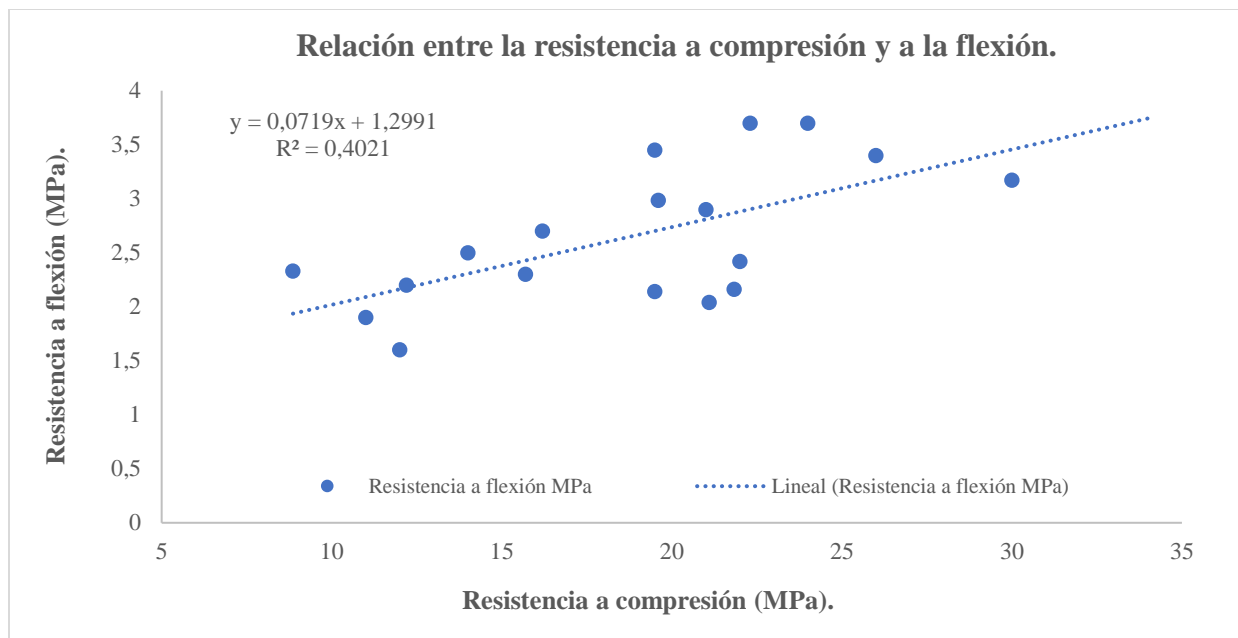


Figura 6.1 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a la flexión del concreto permeable. Fuente: Elaboración propia.

La anterior figura permite establecer la siguiente ecuación, para hallar la correlación entre la resistencia a compresión y la resistencia a la flexión:

$$y = 0,0719x + 1,2991 \quad (6.1)$$

Para el concreto convencional existen ecuaciones en sistema inglés como lo es la ecuación (6.2) unidades en psi y para el sistema internacional la ecuación (6.3) unidades en MPa, que correlacionan la resistencia a compresión con la resistencia a la flexión ACI 330 (2008, p. 8), las cuales se adaptan a los valores en campo. Revisando en la literatura de la ACI se observa que no existe una ecuación a la fecha que correlacione la resistencia a compresión del concreto permeable con la resistencia a la flexión, dada esa situación se propone la ecuación (6.1).

$$Mr = 8\sqrt{f'c} \quad (6.2)$$

$$Mr = 0,7 \sqrt{f'c} \quad (6.3)$$

De la *figura 6.1* se puede establecer que para el concreto permeable no existe una correlación fuerte entre la resistencia a compresión con la resistencia a la flexión debido a que cuenta con más variables para analizar que el concreto convencional. La diferencia principal radica en que para el concreto permeable al presentar una estructura porosa, esta afecta inversamente proporcional la resistencia del concreto, mientras que la estructura del concreto convencional es casi 100% maciza; para poder establecer una correcta correlación para los CP se propone que es necesario establecer rangos para la aplicabilidad de ecuaciones, es decir por ejemplo: para una porosidad entre 10% y 15% exista una ecuación, para una porosidad entre 15% y 20% exista otra ecuación y así sucesivamente.

Aplicando la ecuación (6.1) al Diseño de mezcla N2. y comparando los resultados con la normatividad de la ACI 522-R (2010) se tiene que para la resistencia de 16,7 MPa aplicando este valor en “x” en la ecuación (6.1) da como resultado teórico una resistencia a la flexión de 2,499 MPa. Comparando este valor con la norma de la *Figura 3.3* donde se señala que para una porosidad del 20% la resistencia a flexión se ubica en un valor de 2,5 MPa, justificando así la ecuación propuesta para la literatura estudiada.

6.3 Permeabilidad

Tabla 6.4

Resumen de diseños contra permeabilidad

| | Granulometría del agregado grueso | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------|
| | Porosidad | DS | Infiltración | DS | Cemento | Agua | Agregado | Límite inferior | Límite superior | ρ del agregado | Absorción |
| | % | % | cm/s | cm/s | (kg) | (kg) | (kg) | mm | mm | kg/m ³ | % |
| Grupo A | 17,9 | 8,4 | 1,1 | 1,4 | 408,3 | 136,2 | 1518,6 | 8,2 | 11,4 | 2658,2 | 3,0 |
| G_A: Diseño modificado | 17,9 | 8,4 | 1,2 | 1,5 | 407,6 | 137,4 | 1507,8 | 9,6 | 12,0 | 2597,1 | 3,4 |
| G_A: Diseño tradicional | 17,7 | 9,3 | 0,5 | 0,2 | 410,3 | 132,9 | 1548,0 | 4,5 | 9,8 | 2806,4 | 1,9 |
| Grupo B | 20,8 | 6,8 | 1,0 | 0,7 | 347,6 | 120,5 | 1432,2 | 7,3 | 10,8 | 2574,7 | 3,1 |
| G_B: Diseño modificado | 21,0 | 7,3 | 1,2 | 0,8 | 346,5 | 121,4 | 1373,5 | 7,1 | 10,8 | 2560,0 | 3,6 |
| G_B: Diseño tradicional | 20,6 | 6,4 | 0,7 | 0,6 | 349,5 | 118,8 | 1529,9 | 7,6 | 10,8 | 2601,7 | 2,4 |
| Promedio, general | 19,3 | 7,6 | 1,1 | 1,1 | 379,2 | 128,7 | 1477,1 | 7,8 | 11,1 | 2623,6 | 3,1 |

Nota: El símbolo ρ corresponde a la densidad del agregado grueso. Fuente elaboración propia.

El último y no menos importante parámetro que se analizó fue la infiltración como se observa en la Tabla 6.4. La infiltración está relacionada directamente con la porosidad, es decir, al tener mayor contenido de vacíos la capacidad que tiene el concreto permeable es mayor. En las Tabla 6.1 y Tabla 6.2 se señala que la relación es inversamente proporcional a la resistencia a compresión y la flexión, esta afirmación se encuentra respaldada por American Concrete Institute en su reporte de concreto permeable 522 R (2010), esto quiere decir que al poseer mayor contenido de poros, el concreto permeable mejora sus capacidades hidráulicas pero decrece su resistencia.

7 Conclusiones

Luego de realizar el protocolo de búsqueda y selección, la extracción de datos y análisis de los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

- Existe una correlación inversamente proporcional entre el contenido de vacíos del CP y sus propiedades mecánicas como resistencia a la flexión y compresión, esto significa que, cuando el contenido de vacíos es bajo, el concreto permeable tiene mayor resistencia que un CP con mayor contenido de vacíos, para soportar los esfuerzos a los que es sometido.
- Frente a la información recaudada y el análisis de precio unitario APU realizado, se puede concluir que un concreto permeable es más económico que el concreto tradicional. En la presente investigación se comparó un diseño de 17 MPa contra los diseños propuestos, dando como resultado que el diseño N1 es 16,3% más económico en el uso de cemento y para el diseño N2 es más costoso un 9,5%. Frente al uso del agregado los diseños de concreto permeable son 19,4% más económicos que un diseño de 17 MPa. El consumo del agua de N1 es más económico 36,7% y para N2 es 27,2%. El concreto permeable es 25,5% más económico en su precio final para el diseño propuesto N1; para el diseño N2 representa un 10,6% en comparación con el concreto tradicional de 17 MPa. El principal factor que representa el máximo ahorro de material es el agregado fino. Para el diseño de 17 MPa tradicional el 17% del precio de materias primas estaba constituido por arena, de los \$285.033 pesos \$49.140 era agregado fino.
- Los resultados obtenidos a partir de la información disponible en la literatura sugieren que es viable la aplicación de esta tecnología en Barranquilla, que tiene

beneficios ambientales en la mejora de la calidad del agua, atenuación del efecto de isla de calor, reduce o evita las escorrentías superficiales y tiene bajos costos de producción y por lo tanto es llamativo para cualquier proyecto.

- Asimismo, se logró proponer una estructura de concreto permeable bajado la normatividad del *American Concrete Institute* en su reporte 330R-08 dando como resultado una capa de concreto permeable utilizando solo agregado grueso con una granulometría No. 67, un espesor de 24 cm, una base granular de 15 cm, para aumentar la capacidad de almacenaje de agua mientras transcurre el tiempo de concentración del agua producto de la precipitación.
- Finalmente, de acuerdo con el análisis realizado de 50 diseños de mezcla a nivel internacional, se logra establecer que el uso de aditivos bien sea como reemplazo parcial del material cementante aumenta la resistencia, pero incrementa el precio del concreto permeable y de este modo perdiendo una de sus cualidades más llamativas.
- La baja aplicación del concreto permeable radica en los valores típicos de resistencia a la compresión, que comprende desde 10 hasta los 20 MPa usando solamente agregado grueso, cemento y agua. Para ampliar su uso se debe descubrir nuevas tecnologías de los materiales donde se obtengan mayores resistencias a compresión y a la flexión, para así potencialmente poder aumentar su aplicación.
- El espesor de la capa de concreto permeable se asumió bajo las recomendaciones de Norbert (2008, p 192). Es importante señalar que el espesor de la base granular y sub rasante pueden ser disminuidos debido al tiempo de concentración el cual se

asumió de 1 hora como caso genérico de estudio, sin embargo, se optaron por factores de seguridad propuestos por Woods-Ballard et al. (2007) para compensar los factores de incertidumbres, aumentando la intensidad de lluvia en el caso más crítico de 74,6 mm/h a 223,8 mm/h. El tiempo de concentración podrá ser ajustado según el tamaño y características de la cuenca que tribute el pavimento permeable en análisis, lo cual potencialmente resultaría en un correspondiente ahorro de materiales.

- Ciertamente para el concreto convencional constituido por cemento, agua, agregado grueso y fino existen ecuaciones como la (6.2) para el sistema inglés y sus unidades son en psi y para el sistema internacional la ecuación (6.3) unidades en MPa, que correlacionan su resistencia a compresión con la resistencia a la flexión y los valores obtenidos son muy certeros con los valores de ensayos ACI 330 (2008). Por el contrario, para el concreto permeable no existe una ecuación a la fecha que el modelo se adapte a los valores de ensayos, esto se debe a que el CP incluye la complejidad de su estructura porosa. Para mejorar la tecnología del concreto permeable se propone que debe ser necesario la aplicación de distintas fórmulas en función de un intervalo de porosidades, por ejemplo: para una porosidad entre 10% y 15% exista una ecuación, para una porosidad entre 15% y 20% exista otra ecuación y así sucesivamente.

Referencias

- AASHTO. (2017). *AASHTO M 80-13 (2017)*. https://www.techstreet.com/standards/aashto-m-80-13-2017?product_id=1862985#jumps
- AENOR Asociación Española de Normalización. (2001). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo*.
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0024053>
- AENOR Asociación Española de Normalización. (2009a). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*.
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0043808>
- AENOR Asociación Española de Normalización. (2009b). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042552>
- AENOR Asociación Española de Normalización. (2014). *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052839>
- Alcaldía de Barranquilla. (, February). *Plan de Ordenamiento Territorial – Alcaldía de Barranquilla*. 2014. <https://www.barranquilla.gov.co/transparencia/planeacion/politicas-lineamientos-y-manuales/planes-estrategicos/plan-de-ordenamiento-territorial>
- AlShareedah, O., Nassiri, S., Chen, Z., Englund, K., Li, H., & Fakron, O. (2019). Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00231.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00231>

AlShareedah, O., Nassiri, S., & Dolan, J. D. (2019). Pervious concrete under flexural fatigue loading: Performance evaluation and model development. *Construction and Building Materials*, 207, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.111>

American Concrete Institute. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (Issue Reapproved).

American Concrete Institute 330R. (2008). *Guide for the design and construction of ferrocement elements*. www.concrete.org

Anastasiou, E. K., Liapis, A., & Papachristoforou, M. (2017). Life Cycle Assessment of Concrete Products for Special Applications Containing EAF Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.138>

Argos 360. (2018). *RECORRIENDO LATITUDES CON CONCRETO PERMEABLE*. 2018. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/recorriendo-latitudes-con-concreto-permeable>

Argos Colombia. (2019). *Gravas y arenas ensacadas*. <https://colombia.argos.co/Conoce-nuestros-productos/gravas-y-arenas-ensacadas>

ASTM International. (2009). Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue C). <https://doi.org/10.1520/C1701>

Ávila Acosta, R. (2001). *Metodología de la investigación: cómo elaborar la tesis y/o investigación : ejemplos de diseños de tesis y/o investigación*. Estudios y Ediciones R.A. <https://books.google.com.co/books?id=sZ37SAAACAAJ>

Barnhouse, P. W., & Srubar, W. V. (2016). Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 110, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.014>

- Batezini, R., & Balbo, J. T. (2015). Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8(3), 248–259. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952015000300002>
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Bester, J. J., Kruger, D., & Hinks, A. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. In *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- Blu Radio. (2019). *Pelea bajo la lluvia en la Circunvalar - Blu Radio*. <https://www.bluradio.com/sociedad/al-menos-100-jovenes-se-enfrentaron-piedra-bajo-la-lluvia-en-la-circunvalar-crbe-228996-ie5134696>
- Bruisnma, J., K. Smith, Peshkin, D., Ballou, L., & C., E. (2017). Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports. *National Academies Press*, 02–64.
- Cackler, E. ., Ferragut, T., Harrington, D. ., Ramussen, R. ., & Wiegand, P. (2006). Evaluation of U.S. And European Concrete Pavement Noise Reduction Methods. *Federal Highway Administration*.
- Calderon, Y. V., & Charca, J. A. (2011). INVESTIGACION DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES DE CONCRETO POROSO. *Universidad de San Agustín*.
- Castro, J., De Solminihac, H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingenieria de Construccin*, 24(3), 271–284.
- Cementos Argos. (2019). *Generalidades y tipos de aditivos para el concreto según la NTC 1299*.

<https://argos.co>

Cemex Colombia, S. A. (2019). *Grava y gravilla*.

<https://www.cemexcolombia.com/productos/agregados/gravas>

Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2017). Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development. *Construction and Building Materials*, 153, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>

Chang, J. J., Yeih, W., Chung, T. J., & Huang, R. (2016). Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, 109, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.049>

Chen, J., Li, H., Huang, X., & Wu, J. (2015). Permeability loss of open-graded friction course mixtures due to deformation-related and particle-related clogging: Understanding from a laboratory investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001282](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001282)

Chen, X., Wang, H., Najm, H., Venkateela, G., & Hencken, J. (2019). Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117714. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117714>

Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 22(5), 894–901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007>

Chu, L., Fwa, T. F., & Tan, K. H. (2017). Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials. *Transportation Research Record*, 91–103.

Concretedecor. (2010). *Pretty and Pervious: Decorative Options for Pervious Concrete | Concrete*

Decor. February 8, 2010. <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-10-no-2-februarymarch-2010/decorative-options-for-pervious-concrete/>

Cooley, L. A. (1999). Permeability of Superpave Mixtures: Evaluation of Field Permeameters. *NCAT Report 99-01*, 99, 63.

COSTA, F. B. P., LORENZI, A., HASELBACH, L., & SILVA FILHO, L. C. P. (2018). Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 11(5), 1151–1159. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000500013>

Davie, T. (2008). Fundamentals of Hydrology, Second Edition. In *Management* (Vol. 298, Issue 10). <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=x0HfA6HJvogC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fundamentals+of+Hydrology&ots=fi3rcmkBRZ&sig=xXLEc2AGr243RS1Iqr6q66rbyFM>

Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2019). Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, 213, 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099>

Delatte, N. (2008). concrete pavement design, construction, and performance. In 2008 (11th ed.).

Díaz Granados, V. R. (1998). Curvas sinteticas regionalizadas de Intensidad-Duracion-Frecuencia para colombia. *XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrologia*, 12.

El-Hassan, H., Kianmehr, P., & Zouaoui, S. (2019). Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. *Construction and Building Materials*, 212, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>

El Heraldó. (2018, October 6). *En video / Así se vivió el desbordamiento del arroyo de Rebolo / El*

Heraldo. 2018. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/en-video-asi-se-vivio-el-desbordamiento-del-arroyo-de-rebolo-550488>

El Herald. (2019a). *Vivienda y comercio jalonan construcción en el Atlántico* / *El Herald*. 2019. <https://www.elheraldo.co/economia/vivienda-y-comercio-jalonan-construccion-en-el-atlantico-601136>

El Herald. (2019b, April 23). *Basuras obligaron cierre de bocatoma del acueducto: Triple A* / *El Herald*. 2019. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/basuras-obligaron-cierre-de-bocatoma-del-acueducto-triple-622550>

El Herald. (2020, May 19). *En imágenes | Emergencias por primer aguacero de 2020 en Barranquilla y su área metropolitana* / *El Herald*. 2020. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/en-imagenes-emergencias-por-primer-aguacero-de-2020-en-barranquilla-y-su-area>

El Tiempo. (2018, May 13). *Los arroyos en Barranquilla siguen causando daños pese a las obras que se están realizando - Barranquilla - Colombia - ELTIEMPO.COM*. 2018. <https://www.eltiempo.com/colombia/barranquilla/los-arroyos-en-barranquilla-siguen-causando-danos-pese-a-las-obras-que-se-estan-realizando-216874>

El Tiempo. (2020a, March 15). *Colegios y universidades de Barranquilla suspenden clases por corid-19 - Barranquilla - Colombia*. 2020. <https://www.eltiempo.com/colombia/barranquilla/colegios-y-universidades-de-barranquilla-suspenden-clases-por-covid-19-473104>

El Tiempo. (2020b, June 2). *Crean plan para erradicar pelea de pandilleros en Barranquilla - Barranquilla - Colombia - ELTIEMPO.COM*. 2020. <https://www.eltiempo.com/colombia/barranquilla/crean-plan-para-erradicar-pelea-de>

pandilleros-en-barranquilla-502174

El Tiempo. (2020c, June 27). *Toneladas de basura en arroyos de Barranquilla - Barranquilla - Colombia - ELTIEMPO.COM*. 2020.

<https://www.eltiempo.com/colombia/barranquilla/toneladas-de-basura-en-arroyos-de-barranquilla-511940>

Elango, K. S., & Revathi, V. (2017). Fal-G Binder Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.086>

Environmental Protection Agency. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet Porous Pavement*. <https://www.epa.gov/>

Fernández, R. J., & Navas, A. (2012). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. *Infraestructura Vial*, 13(24), 40–49.

Flores, C. E., & Pacompia, I. A. (2015). “*DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO PERMEABLE CON ADICIÓN DE TIRAS DE PLÁSTICO PARA PAVIMENTOS $f'c$ 175 kg/cm² EN LA CIUDAD DE PUNO*.” UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.

Gaedicke, Cristian, Marines, A., Mata, L., & Miankodila, F. (2015). Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete. *Revista Ingenieria de Construcción*, 30(3), 159–167.

<https://doi.org/10.4067/S0718-50732015000300001>

Gaedicke, Cristián, Torres, A., Huynh, K. C. T., & Marines, A. (2016). A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. *Construction and Building Materials*, 125, 271–278.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.031>

Garber, S., Ramussen, R. ., & Harrington, D. . (2011). Guide to Cement-based Integrated Pavement

Solutions. *Portland Cement Association*.

García, E. (2011). *CONTROL DE ESCORRENTÍAS URBANAS MEDIANTE PAVIMENTOS PERMEABLES: APLICACIÓN EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS* [Universidad Politécnica de Valencia].

http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15383/TFM_EGH.pdf?sequence=1

Gobierno de Colombia. (2019, March 15). *Medidas tomadas para la Educación*. 15/03/2020.

<https://coronaviruscolombia.gov.co/Covid19/acciones/acciones-de-educacion.html>

Harvey, J., Shan, S., Li, H., Jones, D. J., & Wu, R. (2017). Fully Permeable Pavement for Stormwater Management: Progress and Obstacles to Implementation in California. *Airfield and Highway Pavements 2017: Pavement Innovation and Sustainability - Proceedings of the International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017, 2017-Augus(November)*, 126–136. <https://doi.org/10.1061/9780784480946.012>

Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. T., & Schaefer, V. R. (2011). Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. *Transportation Research Record*, 2240, 107–115. <https://doi.org/10.3141/2240-14>

Haselbach, L., Poor, C., & Tilson, J. (2014). Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.013>

Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. del P. (2010). Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa. In *Metodología de la investigación*. <http://www.casadellibro.com/libro-metodologia-de-la-investigacion-5-ed-incluye-cd-rom/9786071502919/1960006>

Holmes, R. R., Hart, M. L., & Kevern, J. T. (2017). Heavy metal removal capacity of individual

components of permeable reactive concrete. *Journal of Contaminant Hydrology*, 196, 52–

61. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.12.005>

Hormigón Express S.A. (2018). *Hormigón Express*. 2018. <https://www.hormigonexpress.com/>

Hu, N., Zhang, J., Xia, S., Han, R., Dai, Z., She, R., Cui, X., & Meng, B. (2020). A field

performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement.

Journal of Cleaner Production, 263, 121463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121463>

Huang, B., Wu, H., Shu, X., & Burdette, E. G. (2010). Laboratory evaluation of permeability and

strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*,

24(5), 818–823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>

Ibrahim, H. A., Goh, Y., Ng, Z. A., Yap, S. P., Mo, K. H., Yuen, C. W., & Abutaha, F. (2020).

Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of

construction and demolition waste as aggregates. *Construction and Building Materials*, 253,

119251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119251>

ICONTEC. (1995a). Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la densidad y la

absorción del agregado fino. *Ntc 237*, 14.

ICONTEC. (1995b). *Norma Técnica Colombiana 92. Ingeniería Civil y Arquitectura*.

Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas y agregados.

IDEAM. (2018). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*.

<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

IDEAM. (2019). *Ideam - Ideam*. <http://www.ideam.gov.co/>

INCONTEC. (1982a). *NTC 1757 - MECÁNICA. MEZCLADORAS DE HORMIGÓN*.

GENERALIDADES.

INCONTEC. (1982b). *NTC 31 - INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. DEFINICIONES*. In

Norma Tecnica Colombiana.

INCONTEC. (1994). *NTC 1377 - Elaboracion y Curado de Especimenes de Concreto para Ensayos de Laboratorioano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC.*

INCONTEC. (1995a). *INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA.DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA ALDESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37,5 mm, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.*

INCONTEC. (1995b). *Norma Técnica Colombiana NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. 14.*

INCONTEC. (2000). *NTC 174 - Especificaciones de los agregados para concreto. In Norma Tecnica Colombiana.*

INCONTEC. (2002). *NTC 32 - Tejido de Alambre y Tamices para Propósitos de Ensayo.*

INCONTEC. (2008). *NTC 1299 - CONCRETOS. ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO (Issue 571).*

INCONTEC. (2013). *NTC 813 - AGUA. AGUA POTABLE (Vol. 813).*

INCONTEC. (2014). *NTC 2031 - INSTRUMENTOS DE PESAJE DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMÁTICOS. REQUISITOS METROLOGICOS Y TÉCNICOS. PRUEBAS (Issue 571).*

Institute American Concrete. (2010). *ACI 522R-10. Report on Pervious Concrete.*

Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. (2014). *NTC 121 - Cemento pórtland. especificaciones físicas y mecánicas. In Norma Tecnica Colombiana.*

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - INCONTEC. (2010). *NTC 673 - Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especimenes Cilindricos de Concreto (Issue 571).*

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (2004, May 1). *Propiedades del concreto.*

2004. <http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>

Instituto Nacional de Vías. (1994). *I.N.V.E - 402 - 07 ELABORACION Y CURADO EN EL LABORATORIO DE MUESTRAS DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE COMPRESION Y FLEXION.*

Instituto Nacional de Vías. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.* www.icpc.org.co

Instituto Nacional de Vías. (2013). *I.N.V.E - 142 - 07 RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN).*

Instron. (2020). *Resistencia a la compresión.* <https://www.instron.com.ar/es-ar>

INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras* (Vol. 21).

Jones, D., Harvey, J., Li, H., & Campbell, B. (2010). Summary of Laboratory Tests to Assess Mechanical Properties of Permeable Pavement Materials. *Researchgate.*

Kant, S., Ransinchung, G. D., Rahul, K. L., & Debbarma, S. (2020). Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures. *Construction and Building Materials*, 255, 119260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119260>

Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J. T., Jones, D., & Muhunthan, B. (2012). Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *Journal of Environmental Management*, 95(1), 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>

Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.01.001>

- Kayhanian, M., Vichare, A., Green, P. G., & Harvey, J. (2009). Leachability of dissolved chromium in asphalt and concrete surfacing materials. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3574–3580. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.011>
- Kevern, J. (2011). Operation and Maintenance of Pervious Concrete Pavements. *TRB 2011 Annual Meeting*, 7495(December 2010), 1–16.
- Kevern, J. (2015). Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 43 No.3, 544–553.
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Leadership In Energy & Environmental Design. (2018). *USGBC homepage / USGBC*. <https://new.usgbc.org/>
- Lee, M. ., Tia, M., Chuang, S. ., & Huang, Y. (2013). Pollution and purification study of the permeable concrete pavement material. *J. Mater. Civ. Eng.*
- Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., & Kayhanian, M. (2013). Erratum: The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management (Environ. Res. Lett. (2013) 8 (015023)). *Environmental Research Letters*, 8(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/049501>
- Li, Hui, Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>
- Liu, J., & Borst, M. (2018). Performances of metal concentrations from three permeable pavement

- infiltrates. *Water Research*, 136, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.050>
- Liu, T., Wang, Z., Zou, D., Zhou, A., & Du, J. (2019). Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*, 122(August 2018), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.004>
- Lu, G., Wang, Y., Li, H., Wang, D., & Oeser, M. (2019). The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.006>
- Lu, J. X., Yan, X., He, P., & Poon, C. S. (2019). Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1102–1112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.260>
- María Blender. (2015). *Isla de calor urbana - Arquitectura y Energía*. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Perez, A., & Cánovas, A. (2009). Instituto Superior de Ciencias Médicas de La Habana (ISCM-H). In *Rev haban cienc méd La Habana: Vol. VIII* (Issue 2).
- Meininger, R. C. (1988). *No-Fine Pervious Concrete for Paving*.
- Meng, X., Chi, Y., Jiang, Q., Liu, R., Wu, K., & Li, S. (2019). Experimental investigation on the flexural behavior of pervious concrete beams reinforced with geogrids. *Construction and Building Materials*, 215, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.217>
- Monje, C. A. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa. Guía didáctica. *Universidad Surcolombiana*, 1–216. <http://carmonje.wikispaces.com/file/view/Monje+Carlos+Arturo+->

+Guía+didáctica+Metodología+de+la+investigación.pdf

Montes, F., & HASELBACH, L. (2006). Measuring Hydraulic Conductivity. *Environ. Eng. Sci.*

Montes, F., Valavala, S., & Haselbach, L. (2005). A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete. *Journal of ASTM International*, 2, 1–13.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1520/JAI12931>. ISSN 1546-962X

Moreno-Rodriguez, N. (2014). Zonificación geotecnica de los suelos en Barranquilla. *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology: "Excellence in Engineering to Enhance a Country's Productivity"*, 1–9.

Moujir, Y. F., & Castañeda, L. F. (2014). Diseño y aplicacion de concreto poroso para pavimentos [Universidad Pontificia Bolivariana]. In *The British Journal of Psychiatry* (Vol. 112, Issue 483). <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>

National Ready Mixed Concrete Association. (2000). How Should Strength be Measured for Concrete Paving? In 2000. <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/16p.pdf>

National Ready Mixed Concrete Association. (2006). CIP 16 Resistencia a Flexión del concreto. *Concrete in Practice*, 2. <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf>

National Ready Mixed Concrete Association. (2015). CIP 35 - Prueba de Resistencia a Compresion del Concreto. *El Concreto En La Práctica ¿Qué, Por Qué y Como?*, 2.

<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>

NCAT Field Permeameter. (2019). *National Center for Asphalt Technology*.

<http://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/>

Organización Mundial de la Salud. (2020, April 1). *Orientaciones para el público*. 2020.

<https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>

Orlando López, J. (2004). *POROSIDAD DEL CONCRETO* [Universidad de San Carlos de

Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2394_C.pdf

Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: Una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Revista Ingenieria de Construccion*, 33(2), 161–172. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000200161>

Panza, E. (2014). Historia De La Planeación En Barranquilla: Fundamentos Conceptuales Y Normativos Para Su Construcción. *Módulo Arquitectura Cuc*, 9(1), 11–34.

Pavipor. (2018). *Pavimento hormigón poroso Dry-Quick - Pavimentos Pavipor*.
<https://pavipor.com/pavimento-hormigon-poroso/>

Pieralisi, R., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2017). Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. *Cement and Concrete Research*, 102(August), 149–160.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.009>

Porrero, J. S., Ramos, C. R., Grases, J. G., & Velazco, J. G. (2014). *Manual del concreto estructural* (1st ed., Vol. 1). <https://es.slideshare.net/nilsey/manual-del-concreto>

Publimetro. (2018, April 10). *Expertos estudian “gota a gota” de dónde provienen los arroyos en Barranquilla y sus conclusiones lo sorprenderán* / *Publimetro Colombia*. 2018.
<https://www.publimetro.co/co/barranquilla/2018/05/10/expertos-estudian-gota-gota-donde-provienen-los-arroyos-barranquilla-conclusiones-lo-sorprenderan.html>

PUERTO DE BARRANQUILLA SOCIEDAD PORTUARIA. (2018). *Puerto De Barranquilla*.
<https://www.puertodebarranquilla.com/index.php/historia/>

Quiroz, M. V., & Osuna, L. E. (2006). *APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN LA ASIGNATURA DE «TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN»*.

Rangelov, M., Nassiri, S., Chen, Z., Russell, M., & Uhlmeier, J. (2017). Quality evaluation tests

for pervious concrete pavements' placement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(3), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.01.007>

Remolina Durán, J. G. (2018). *DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICO-MECANICOS Y DE DURABILIDAD EN CONCRETO RECICLADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)*. Universidad de la costa.

República De Colombia Ministerio De Minas Y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero* (Agencia Na).

<https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>

Ribeiro, A., Dos Santos, V., Pagnussat, D. T., & Brandalise, R. N. (2018). Assessment of a system for the prediction of water permeability coefficient in pervious concretes. *Ceramica*, 64(372), 519–525. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643722445>

Rodríguez-Rojas, M. I., Huertas-Fernández, F., Moreno, B., Martínez, G., & Grindlay, A. L. (2018). A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain. *Journal of Environmental Management*, 205, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.075>

Saadeh, S., Ralla, A., Al-Zubi, Y., Wu, R., & Harvey, J. (2019). Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, xxxx, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.02.001>

Sandoval, G. F. B., de Moura, A. C., Jussiani, E. I., Andreello, A. C., & Toralles, B. M. (2020). Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. *Construction and Building Materials*, 248, 118672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118672>

SANDOVAL, G. F. B., GALOBARDES, I., DIAS, C., CAMPOS, A., & TORALLES, B. M.

(2019). Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(3), 590–607.

<https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000300009>

Sandoval, G. F. B., Galobardes, I., Schwantes-Cezario, N., Campos, A., & Toralles, B. M. (2019).

Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). *DYNA*

(Colombia), 86(209), 151–159. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77613>

Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and*

Environment, 42(11), 3830–3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

Siriwardene, N. R., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2007). Clogging of stormwater gravel

infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water Research*, 41(7),

1433–1440. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.040>

Stacey Enesey, K. (2010). *Pretty and Pervious: Decorative Options for Pervious Concrete*. Feb 8.

<https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-10-no-2-februarymarch-2010/decorative-options-for-pervious-concrete/>

Stinson, M. R., Berengier, M. C., Daigle, G. A., & Hamet, J. F. (1997). Porous road pavements:

acoustical characterization and propagation effects. *J. Acoust. Soc. Am.*, 155–162.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.417998>

Tabatabaeian, M., Khaloo, A., & Khaloo, H. (2019). An innovative high performance pervious

concrete with polyester and epoxy resins. *Construction and Building Materials*, 228,

116820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116820>

Tavares, L. M., & Kazmierczak, C. S. (2016). The influence of recycled concrete aggregates in

pervious concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9(1), 75–89.

<https://doi.org/10.1590/s1983-41952016000100006>

Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). Pervious Concrete Pavements. *Portland Cement Association*.

The Concrete Network. (n.d.). *Pervious Concrete Pavements - Enviromental Concrete - The Concrete Network*. Retrieved June 13, 2020, from

<https://www.concretenetwork.com/pervious/>

Tian, B., Liu, Y., Niu, K., Li, S., Xie, J., & Li, X. (2014). Reduction of Tire-Pavement Noise by Porous Concrete Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 233–239.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000809](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000809)

Torres, J., Mejía de Gutiérrez, R., Rodríguez, C., Rodríguez, E., & Delvasto, S. (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista Facultad de Ingenieria*, 48, 55–64.

Ulloa-Mayorga, V. A., Uribe-Garcés, M. A., Paz-Gómez, D. P., Alvarado, Y. A., Torres, B., & Gasch, I. (2018). Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates. *Ingenieria e Investigacion*, 38(2), 34–41.

<https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.67491>

Unión temporal de obras hidráulicas. (2020). *Concreto de 2400 PSI Cotización*.

Universidad del Norte. (2013). *RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LA PROPUESTA DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL DISTRITO DE BARRANQUILLA 2012-2032 GRUPO*. 140.

<https://www.uninorte.edu.co/documents/73923/11941478/Documento+Resumen+POT+2012.pdf/7a6560c4-f0ff-4e03-b600-1aa9bfcc8041?version=1.2>

Valavala, S., Montes, F., & Haselbach, L. (2006). Area rated rational coefficients values for

portland cement pervious concrete pavement. *American Society of Civil Engineers*.

Valdivia, M. (n.d.). *Manuel Valdivia* / Flickr. Retrieved June 13, 2020, from

https://www.flickr.com/photos/manuel_valdivia_munoz/

Wang, G., Chen, X., Dong, Q., Yuan, J., & Hong, Q. (2020). Mechanical performance study of pervious concrete using steel slag aggregate through laboratory tests and numerical simulation. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121208.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121208>

Weiss, P. ., Kayhanian, M., Gulliver, J. ., & Khazanovich, L. (2017). Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. *Int. J. Pavement Eng*, 1–20.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Woods Ballard, B., Construction Industry Research and Information Association, Great Britain, Department of Trade and Industry, & Environment Agency. (2007). The SUDS manual. In *Ciria*,

<http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>

Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1605–1621.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>

Yang, X., Liu, J., Li, H., & Ren, Q. (2020). Performance and ITZ of pervious concrete modified by vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder. *Construction and Building Materials*, 235, 117532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117532>

Yeih, W., & Chang, J. J. (2018). The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, 197, 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.178>

- Yu, F., Sun, D., Wang, J., & Hu, M. (2019). Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 463–475.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140>
- Zhang, K., Yong, F., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2018). Predicting long term removal of heavy metals from porous pavements for stormwater treatment. *Water Research*, 142, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.038>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Yan, C., & Liu, Y. (2017). Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 112–118.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203>
- Zhong, R., Leng, Z., & Poon, C. (2018). Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material : A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, 183, 544–553.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>
- Zhou, H., Li, H., Abdelhady, A., Liang, X., Wang, H., & Yang, B. (2019). Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. *Construction and Building Materials*, 212, 130–139.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.310>
- Zhou, J., Zheng, M., Wang, Q., Yang, J., & Lin, T. (2016). Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. *Construction and Building Materials*, 124, 897–905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.136>
- zoológico de Portland, O. (2016). *zoológico de Portland, Oregon*. <https://www.oregonzoo.org/>

Anexos

Anexo 1

Precipitación máxima en 24 horas ultimo 65 años

Estación: ERNESTO CORTISSOZ. BARRANQUILLA,
COLOMBIA

Elevación:
30 msnm.

Ubicación: 10 53N, 74 47W

| Años | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | P. Max. mm/Di a |
|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-----------------------|
| 1950 | 0 | 0 | 0 | 26 | 34,3 | 15 | 0,2 | 62 | 52 | 28 | 33 | 15 | 62 |
| 1951 | 18 | 0 | 0 | 2 | 33 | 27 | 34 | 62 | 66,2 | 42 | 25,5 | 0 | 66,2 |
| 1952 | 0,6 | 0 | 0 | 28,1 | 91,6 | 56,3 | 15 | 22 | 70 | 110,8 | 21,5 | 3,2 | 110,8 |
| 1953 | 0 | 0 | 0 | 6 | 5,8 | 36,5 | 25 | 1 | 45 | 53 | 38 | 0 | 53 |
| 1955 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 18 | 61 | 82 | 60,5 | 90 | 35,6 | 4 | 90 |
| 1957 | 0 | 0 | 0 | 5 | 38,1 | 8 | 1 | 29,1 | 20,5 | 60,4 | 1 | 0 | 60,4 |
| 1958 | 1 | 0 | 0 | 46,6 | 92,5 | 12,2 | 14,5 | 40 | 47 | 29,7 | 19 | 0 | 92,5 |
| 1961 | 0 | 6,7 | 1 | 20 | 20,2 | 86 | 80 | 20 | 40 | 123 | 45 | 20,4 | 123 |
| 1962 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 10 | 24 | 20 | 100 | 41 | 5 | 2 | 2 | 100 |
| 1963 | 0 | 4 | 0 | 30 | 52 | 45 | 30 | 59 | 45 | 30 | 19,4 | | 59 |
| 1964 | 0 | 0 | 0 | 10 | 26 | 74 | 56 | 13 | 68 | 48,5 | 6 | 0 | 74 |
| 1965 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51,8 | 28,4 | 6 | 23 | 42,9 | 30 | 71,7 | 4 | 71,7 |
| 1966 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 | 87,5 | 54 | 40 | 25,5 | 42,6 | 35 | 78,2 | 87,5 |
| 1967 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 51 | 24,4 | 54 | 19,2 | 58 | 33 | 0,4 | 58 |
| 1968 | 0 | 0 | 0 | | 39,4 | 41 | 16,5 | 43,6 | 17,6 | 68 | 92,5 | 3 | 92,5 |
| 1969 | 0,6 | 0 | 0 | 49,3 | 5 | 40 | 35 | 53,7 | 93,2 | 57,5 | 28,4 | 8 | 93,2 |
| 1970 | 62,5 | 0 | 4 | 8,2 | 21 | 43,4 | 75 | 25 | 53,8 | 43 | 42 | 27 | 75 |
| 1971 | 0,8 | 0 | 0 | 10 | 50 | 25,3 | 2,7 | 14,5 | 77,4 | 84,6 | 32,8 | 0 | 84,6 |
| 1972 | 0 | 0,1 | 3,6 | 10,1 | 53,6 | 21,2 | 0,3 | 16,9 | 10,7 | 84,6 | 4,8 | 0,1 | 84,6 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|-----|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 1973 | 0 | 0 | 0 | 3,6 | 119,2 | 61,7 | 19,5 | 53,5 | 49,7 | 60 | 14,7 | 0,7 | 119,2 |
| 1974 | 0 | 0 | 0 | 2,2 | 3 | 15,2 | 1,6 | 9,9 | 38,8 | 68,4 | 39,7 | 0,2 | 68,4 |
| 1975 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20,8 | 1,3 | 19,1 | 36,7 | 70,7 | 76,6 | 58,9 | 35,5 | 76,6 |
| 1976 | 0 | 0 | 0 | 7,1 | 39,8 | 27,1 | 0,2 | 22,6 | 44,3 | 54,5 | 20,7 | 0 | 54,5 |
| 1977 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 37 | 35,6 | 18,7 | 76,7 | 66,5 | 11,8 | 55,6 | 0 | 76,7 |
| 1978 | 0 | 0 | 0,3 | 12,8 | 103 | 82,6 | 27,7 | 99,7 | 46,8 | 49,1 | 43 | 23,2 | 103 |
| 1979 | 0 | 0 | 0 | 24,3 | 38,3 | 46,9 | 35,6 | 21,7 | 54,4 | 56 | 98 | 3,4 | 98 |
| 1980 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 19,2 | 40,7 | 44,9 | 61 | 49,4 | 48 | 13 | 3,2 | 61 |
| 1981 | 0 | 0 | 0,9 | 41 | 60,7 | 19,5 | 54,6 | 54,8 | 49,4 | 29 | 35 | 118,4 | 118,4 |
| 1982 | 1,4 | 0 | 0 | 40,8 | 43,2 | 28,6 | 47,6 | 7,5 | 70,2 | 40,8 | 7,2 | 0 | 70,2 |
| 1983 | 0 | 6,2 | 3,6 | 15,7 | 8,6 | 17 | 31,7 | 5,4 | 29,3 | 54,3 | 9,9 | 0 | 54,3 |
| 1984 | 0 | 0 | 0 | 5,2 | 54,2 | 51,2 | 87,2 | 47,6 | 50,5 | 31,9 | 16,6 | 0 | 87,2 |
| 1985 | 0 | 0 | 0 | 42,6 | 35,8 | 39,4 | 56,4 | 12,2 | 66,3 | 91,8 | 10,2 | 27 | 91,8 |
| 1986 | 0 | 0 | 0 | 13 | 12,6 | 23,5 | 1,1 | 22 | 19,5 | 103,5 | 23,6 | 2,1 | 103,5 |
| 1987 | 1 | 1,8 | 0 | 46,8 | 82 | 20,8 | 5,6 | 20,7 | 68,5 | 64,2 | 4,9 | 70 | 82 |
| 1988 | 0 | 0 | 0 | 1 | 50 | 87,6 | 51 | 65 | 38,4 | 93,2 | 67,1 | 0 | 93,2 |
| 1989 | 3,7 | 0 | 0 | 0 | 16,3 | 19,4 | 18,3 | 47,3 | 77,2 | 30 | 22,3 | 69,6 | 77,2 |
| 1990 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 12,6 | 4,8 | 2,6 | 31,1 | 25,2 | 81,6 | 44,5 | 14,4 | 81,6 |
| 1991 | 0 | 0,3 | 0,2 | 1,2 | 31,1 | 51,9 | 1,8 | 45,5 | 52,9 | 48,3 | 11,1 | 0 | 52,9 |
| 1992 | 0 | 0 | 0 | 4,7 | 48,3 | 46,9 | 37,8 | 67 | 38,1 | 38,9 | 22,2 | 0 | 67 |
| 1993 | 5 | 0 | 0 | 54,6 | 81,4 | 47 | 100,6 | 51,1 | 106,5 | 28,9 | 35,3 | 3,6 | 106,5 |
| 1994 | 0 | 0 | 8 | 9,5 | 87,9 | 0,7 | 42,3 | 30 | 16,2 | 19,5 | 26,4 | 0 | 87,9 |
| 1995 | 0 | 0 | 0 | 36,6 | 81,4 | 47 | 63,7 | 50,8 | 72,5 | 70,7 | 18 | 0 | 81,4 |
| 1996 | 6,7 | 0 | 11,5 | 0,1 | 48,2 | 18,9 | 38,4 | 15,2 | 50,4 | 71,5 | 14,1 | 0 | 71,5 |
| 1997 | 20,4 | 0 | 1,7 | 2,9 | 15,1 | 31,6 | 8,8 | 37,4 | 37 | 38,2 | 54,6 | 0 | 54,6 |
| 1998 | 0 | 2,2 | 3,4 | 4 | 96,7 | 48,5 | 21,8 | 44 | 63,9 | 61,3 | 52,1 | 90,2 | 96,7 |
| 1999 | 0 | 2,3 | 0 | 24,5 | 50,3 | 53,1 | 22,3 | 27,6 | 32,6 | 32,9 | 67,1 | 50,4 | 67,1 |
| 2000 | 0 | 0 | 0 | 3,1 | 26,8 | 46,6 | 45 | 19,7 | 53 | 64 | 48,5 | 40 | 64 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|------|-----|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 2001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32,9 | 6,5 | 23,1 | 17,5 | 32,9 | 99,3 | 76 | 19,6 | 99,3 |
| 2002 | 0 | 0 | 0 | 6,8 | 39,7 | 25,1 | 77,2 | 41,6 | 70,6 | 69,8 | 3,6 | 13,5 | 77,2 |
| 2003 | 0 | 1,5 | 0 | 26,6 | 18,5 | 35,8 | 25 | 39,5 | 37,8 | 54,1 | 56,1 | 103,8 | 103,8 |
| 2004 | 0 | | | 6,5 | 20,5 | 20,8 | 77,5 | 16,8 | 58,5 | 53,2 | 38,4 | 0 | 77,5 |
| 2005 | 0 | 0 | 0 | 6 | 55,5 | 37,7 | 51,9 | 80,7 | 58,1 | 36,8 | 46,4 | 0 | 80,7 |
| 2006 | 2,5 | 0 | 0,7 | 11,1 | 76,7 | 29,6 | 45 | 27,4 | 49,3 | 40,7 | 59,8 | 0 | 76,7 |
| 2007 | 0 | 0 | 0,9 | 56,9 | 63,5 | 55 | 70,6 | 48,6 | 52,8 | 15,9 | 23,2 | 29,2 | 70,6 |
| 2008 | 0 | 0 | 0 | 39,2 | 25,5 | 58,2 | 14,3 | 53,9 | 34,2 | 29,9 | 140,7 | 0,1 | 140,7 |
| 2009 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31,6 | 10,9 | 23,9 | 131,7 | 15,5 | 62,8 | 13,9 | 4,5 | 131,7 |
| 2010 | 0 | 0,6 | 5,3 | 55,5 | 62,2 | 34,5 | 44,7 | 32 | 27,3 | 35,7 | 43 | 51,4 | 62,2 |
| 2011 | 0 | 0 | 0,1 | 24,3 | 62,8 | 18,1 | 33,4 | 38,8 | 37,9 | 82,8 | 36,6 | 29,6 | 82,8 |
| 2012 | 0 | 0 | 0 | 11,4 | 31,4 | 37,4 | 11,4 | 46,2 | 45,9 | 47,4 | 29,1 | 0 | 47,4 |
| 2013 | 0 | 0 | 0 | 3,2 | 38,4 | 30,9 | 15,1 | 86 | 48,7 | 15,1 | 19 | 0 | 86 |
| 2014 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32,1 | 22,2 | 0,7 | 24,2 | 49,6 | 57,5 | 44,7 | 41,9 | 57,5 |
| 2015 | 0 | 41,4 | 0,4 | 0 | 26,9 | 16,4 | 3,4 | 4 | 26,2 | 39,7 | 64,3 | 0 | 64,3 |
| 2016 | 0 | 0,1 | 0 | 21,8 | 52,5 | 26,9 | 23,8 | 38,2 | 54,5 | 61 | 46 | 15,2 | 61 |
| 2017 | 0 | 0 | 0 | 13,8 | 13,8 | 70,4 | 15 | 58,8 | 54,4 | 23,8 | 36,3 | 1,1 | 70,4 |
| 2018 | 0,9 | 0 | 0 | 44,7 | 74 | 31,4 | 56,8 | 46,7 | 107,1 | 47 | 53,5 | 0 | 107,1 |

Nota. Registro histórico. Fuente: Tomada de: (IDEAM, 2018).